

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA



**VALORIZACION DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR
PROVENIENTE DEL INGENIO MONTE ROSA MEDIANTE ACTIVACION
ALCALINA PARA LA SINTESIS DE GEOPOLIMEROS**

TRABAJO DE DIPLOMA QUE PRESENTA:

Br. Cinthya Valeska Castro Pérez

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

TUTOR:

M en C. Léster Javier Espinoza Pérez

ASESOR:

Dr. José Iván Escalante García

Managua, Nicaragua 2014

DEDICATORIA

Mi tesis está dedicada de manera especial a:

Jehová, quien me ha guiado durante todas las etapas de mi vida, etapas que han estado marcadas de alegrías y tristezas, sin embargo he visto su mano actuando sobre mi vida, ya que todas las cosas que pasan son parte de su bello plan. A ti que en esta carrera de 5 años que culmina, siempre estuviste presente en los momentos de flaqueza, diciéndome que si tú conmigo, quien contra mí.

A Jehová le debo la existencia de la mujer más importante en mi vida, Martha Pérez, la mujer que me dio como madre, sin ella a mi lado guiándome por el camino correcto tomada de la mano de Jehová, sin sus consejos, paciencia, amor, dedicación, empeño y entrega a sus hijos, la culminación con éxito de esta etapa no fuese posible, quiero decirte madre que tu cosecha está dando sus frutos, verás pronto los sueños que tienes hacerse realidad, como lo es este, gracias por ser la fuerza motriz que me inspira a seguir luchando, por brindarme una educación llena de valores, por formar la mujer que soy ahora y por ser un ejemplo de vida a seguir.

A José Castro Mora, mi padre, quien durante el tiempo que ha estado conmigo, de alguna u otra manera ha influido en la formación de lo que soy como persona y antes que nada por ayudar a formar el carácter que tengo.

A mis hermanos Alejandra y José, quienes a pesar de su edad, han estado siempre conmigo, gracias por ser unos de los motivos que me empujan a seguir hacia adelante, este fruto también es suyo.

A todos aquellos, mis compañeros y amigos que aún están y que estuvieron presente en algún momento de alegría y tristeza, que quisiera nombrar, pero recordarlos a todos se hace difícil, gracias por acompañarme durante el tiempo que los he necesitado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Conacyt por su financiamiento a la investigación con número de proyecto **CB2012-182424-Y**.

Agradezco al Ingenio Pantaleón Monte Rosa, por la facilitación del material en estudio y a la Facultad de Ingeniería Química por el apoyo económico para la realización de la estancia.

Agradezco al personal, trabajadores, compañeros del área de cementos y técnicos de laboratorios del Cinvestav, Unidad Saltillo por su apoyo durante la realización de la investigación.

Agradezco al Dr. J. Iván Escalante, su apoyo y gestión para la realización de la estancia en Cinvestav, Unidad Saltillo, clave importante en la culminación con éxito de la tesis, además de guiarme con sus consejos y conocimientos en este recorrido.

Agradezco el apoyo, dedicación de tiempo y confianza al M en C. Léster Espinoza Pérez, quien durante la realización de este trabajo compartió sus conocimientos, llenándose de paciencia, y nunca abandonar este camino que culmina superando mis expectativas.

Agradezco a la Arq. Nesbony Montenegro, quien con su amistad y cariño durante 11 años ha demostrado ser más que una amiga, llegando a ser una hermana.

Agradezco al Ing. Erick López, quien durante la realización de esta tesis colaboró y me guió con sus consejos, demostrándome su amistad incondicional.

Y finalmente agradezco a las personas que de algún u otro modo participaron durante la realización de esta tesis.

OPINION DEL CATEDRATICO GUIA

RESUMEN

La producción de 1 kg de cemento Portland emite al ambiente aproximadamente 1 kg de CO_2 (Dióxido de carbono); con el propósito de disminuir estas emisiones, se buscó desarrollar un geopolímero producido con Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA), para esto se determinó su composición química mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) obteniéndose un contenido de Sílice (SiO_2) y Alúmina (Al_2O_3) de 53.31% y 5.02%, respectivamente, siendo la CBCA un silicoaluminato, materia prima precursora de geopolímeros. Se realizó un estudio de las fases cristalinas presentes en la CBCA mediante Difracción de Rayos X (DRX), encontrándose que posee una estructura predominantemente amorfa, con presencia de fases cristalinas *albita*, *Na* (AlSi_3O_8), y *anortita*, *Ca* ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

Se prepararon sistemas de pastas y morteros de Oxido de Calcio (CaO)-Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2) /CBCA químicamente activados, con un diseño de experimentos de Taguchi se determinaron las formulaciones para la experimentación, dividiéndose en 18 sistemas, siendo 9 sistemas con CaO , en proporciones al 10, 20 y 30% con respecto al peso de la CBCA, y los restantes 9 sistemas, con Ca(OH)_2 en las mismas proporciones. El agente activante se agregó en concentraciones del 5, 10 y 15% Oxido de sodio (Na_2O) con respecto al peso de la CBCA. La fluidez de las pastas se ajustó mediante la adición de agua de manera controlada, utilizando la mesa de fluidez para su determinación. Los sistemas de pastas y morteros se vaciaron en moldes cúbicos de 2.54 cm de lado, fueron vibrados y curados a 20°C , 40°C y un tratamiento térmico de 20°C por 6 horas- 60°C por 12 horas y 20°C por 6 horas, durante 1, 3, 7, 14 y 28 días. En el caso de las pastas se retiró un cubo por cada fecha, y se sumergió en acetona para detener el avance de la reacción, seguidamente se secó en una cámara de vacío (35°C y 25 in-Hg). Las muestras de morteros se sometieron a ensayo de resistencia mecánica a la compresión (RMC) a las fechas indicadas, tomándose un promedio de 3 cubos por formulación. El sistema con 30% Ca(OH)_2 , 70%CBCA y 5% Na_2O desarrolló la mayor RMC de 5.48 MPa, y el de menor RMC fue el sistema con 10% Ca(OH)_2 , 90%CBCA y 15% Na_2O (0.24 MPa), ambos sistemas a 28 días de curado. Se seleccionaron sistemas de pastas, en base a la RMC que presentaron en las muestras de morteros, para su caracterización por diversas técnicas. Los resultados de DRX mostraron que el halo amorfo de la CBCA se recorrió hacia la derecha, lo cual se debe a los cambios estructurales que sufrió el material al formar la red de silicoaluminatos, y la formación de *calcita* (CaCO_3), la cual se traslapa en $2\theta=30^\circ$ con el Silicato de calcio hidratado (*C-S-H*). La evaluación de las intensidades del pico *C-S-H* es complicada por sobreponerse con el pico de CaCO_3 , además de estar sobrepuesto con el halo amorfo de la CBCA sin reaccionar. Se observaron las microestructuras de las pastas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), dada la alta porosidad de la CBCA las muestras tuvieron muchos relieves. Se realizó microanálisis en las microestructuras mediante EDS (Espectroscopía por Dispersión de Energía), encontrándose altos porcentajes de *Si* y *Ca*, que constituyen el compuesto semicristalino *C-S-H*, y porcentajes de *Si*, *Ca* y *Al*, con la posible presencia del gel geopolimérico Silicoaluminato de calcio hidratado (*C-A-S-H*). Se dio seguimiento a la reacción de geopolimerización mediante la técnica de Análisis Termogravimétrico y Térmico Diferencial (ATG y ATD), encontrándose picos endotérmicos y exotérmicos que indican la presencia de las fases de *calcita* y *anortita*.

TABLA DE CONTENIDO

OPINION DEL CATEDRATICO GUIA	iii
RESUMEN.....	iv
I. INTRODUCCION.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. JUSTIFICACION	6
IV. OBJETIVOS	7
4.1 Objetivo general.....	7
4.2 Objetivos específicos.....	7
V. MARCO TEORICO	8
5.1 Geopolímeros	8
5.1.1 Definición	8
5.1.2 Estructura.....	8
5.1.3 Mecanismo de reacción	9
5.2 Activación alcalina	11
5.2.1 Hidróxido de sodio como activador alcalino	12
5.3 Variables que intervienen en la síntesis de geopolímeros	12
5.3.1 Contenido de agua	12
5.3.2 Temperatura y tiempo de curado	12
5.3.3 Composición química	13
5.4 Puzolanas	13
5.4.1 Clasificación	13
5.4.1.1 Ceniza de bagazo de caña de azúcar	14
5.4.1.1.1 Fuente de la CBCA	15
5.5 Aditivos	16
5.5.1 La Cal.....	16
5.6 Pastas y morteros.....	17
5.7 Técnicas de caracterización	18
5.7.1 Técnicas de caracterización físico-química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y $\text{Ca}(\text{OH})_2$	19
5.7.1.1 Difracción de Rayos.....	19
5.7.1.2 Espectrometría de Difracción por rayos láser.....	20
5.7.1.3 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.....	20
5.7.2 Técnicas de caracterización del agregado fino	20
5.7.2.1. Análisis granulométrico.....	20
5.7.2.2. Módulo de finura	20

5.7.3 Técnicas de caracterización en pastas frescas	21
5.7.3.1 Determinación de fluidez	21
5.7.4 Técnicas de caracterización en pastas endurecidas	22
5.7.4.1 Análisis térmico diferencial y termo-gravimétrico simultáneo	22
5.7.4.2 Microscopia Electrónica de Barrido	22
5.7.5 Ensayo físico-mecánico en mortero endurecido	23
5.7.5.1 Determinación de la resistencia mecánica a la compresión	23
VI. HIPOTESIS	23
VII. METODOLOGIA	24
7.1 Acondicionamiento y caracterización de materias primas	24
7.1.1 Lugar de desarrollo	24
7.1.2 Materiales.....	24
7.1.2.1 Ceniza de bagazo de caña de azúcar	24
7.1.2.2 Hidróxido de Calcio.....	29
7.1.2.3 Oxido de Calcio	30
7.1.2.4 Agua de mezclado	31
7.1.2.5 Hidróxido de sodio	31
7.1.2.6 Agregado fino (pétreo).....	32
7.2 Métodos	33
7.2.1 Planteamiento de los factores de estudio.....	33
7.2.2 Diseño experimental.....	34
7.2.3 Preparación de sistemas.....	35
7.2.3.1 Preparación de pastas.....	35
7.2.3.1.1 Ensayo de fluidez.....	36
7.2.3.2 Elaboración de probetas cúbicas.....	36
7.2.3.2.1 Ensayo de RMC	37
7.3 Caracterización de pastas selectas	37
7.3.1 Difracción por Rayos X.....	37
7.3.2 Microscopia Electrónica de Barrido y Espectroscopía por Dispersión de Energía.....	38
7.3.3 Análisis térmico diferencial y termogravimétrico	39
7.4 Morteros de CaO/CBCA y Ca(OH) ₂ /CBCA sometidos a curado en agua y curado a 100°C	40
7.4.1 Ensayo de RMC de morteros curados en agua y curados a 100°C	40
VIII. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	41
8.1 Resultados de ensayo de fluidez	41

8.2 Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión en morteros CaO/CBCA	42
8.3 Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión en morteros Ca(OH) ₂ /CBCA	44
8.4 Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión de morteros curados en agua y a 100°C	53
8.5 Resultados de Microscopia Electrónica de Barrido.....	57
8.5.1 Análisis microestructural	58
8.5.2 Composición química de los productos de reacción mediante el análisis puntual por EDS.....	66
8.6 Resultados de Difracción de Rayos X.....	70
8.7 Resultados de Análisis Térmico Diferencial.....	74
8.8 Discusión general del mecanismo de reacción.....	78
IX. CONCLUSIONES.....	80
X. RECOMENDACIONES.....	82
XI. NOMENCLATURA.....	83
XII. BIBLIOGRAFÍA	86
XIII. ANEXOS	89

LISTADO ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula empírica de los polisialatos.....	9
Ecuación 2. Esquema de formación del material geopolimérico descrito por Davidovits.....	10
Ecuación 3. Ecuación de Bragg.....	19
Ecuación 4. Cálculo del porcentaje retenido.....	21
Ecuación 5. Cálculo del porcentaje de fluidez	21
Ecuación 6. Resistencia mecánica a la compresión	23
Ecuación 7. Cálculo de la RMC en MPa.....	23

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Patrón de DRX de la CBCA sin reaccionar	5
Figura 2. Estructura de la red sialato	8
Figura 3. Proceso de modificación del bagazo en la quema	15
Figura 4. Compuestos de pastas y morteros.....	18
Figura 5. Interacción de los Rayos X con los átomos.....	19
Figura 6. Esquema de metodología empleada en la tesis.....	24
Figura 7. Patrón de DRX de la CBCA antes de la activación mecánica	26
Figura 8. Patrón de DRX de la CBCA después de la activación mecánica	26
Figura 9. Fotomicrografías de la CBCA.....	27
Figura 10. CBCA sin reaccionar a) Micrografía y b) Espectro	27
Figura 11. Distribución de tamaño de partícula de la CBCA antes y después de la molienda.....	28

Figura 12. Patrón de DRX del Ca(OH)_2	30
Figura 13. Distribución de tamaño de partícula del Ca(OH)_2	30
Figura 14. Curva granulométrica de del agregado fino (arena sílice)	32
Figura 15. Esquema del ensayo de RMC	37
Figura 16. Esquema de un MEB. Recuadro: Interacciones de un haz con un sólido	39
Figura 17. Comportamiento del porcentaje de fluidez en pastas.....	42
Figura 18. Resultados de evolución de resistencia mecánica a la compresión con el tiempo de morteros CaO/CBCA	43
Figura 19. Resultados de evolución de resistencia mecánica a la compresión con el tiempo de morteros $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$	44
Figura 20. Morteros de CaO/CBCA respecto a morteros $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$	46
Figura 21. Gráfica de superficie de respuesta para RMC a 28 días de morteros CaO/CBCA	48
Figura 22. Gráfica de contorno de RMC a 28 días de morteros de CaO/CBCA frente a los factores $\% \text{Na}_2\text{O}$ vs. $\% \text{CaO}$	49
Figura 23. Efectos principales para relaciones S/N para resistencia de morteros CaO/CBCA a 28 días	50
Figura 24. Gráfica de superficie de respuesta para RMC a 28 días de morteros $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$	51
Figura 25. Gráfica de contorno de RMC a 28 días de morteros de $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ frente a los factores $\% \text{Na}_2\text{O}$ vs. $\% \text{Ca(OH)}_2$	52
Figura 26. Efectos principales para relaciones S/N para resistencia de morteros $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ a 28 días	53
Figura 27. Morteros de CaO/CBCA curados a 100°C y curados en agua y 100°C	54
Figura 28. Morteros de $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ curados a 100°C y curados en agua y a 100°C	55
Figura 29. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-7 a 3 días	58
Figura 30. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-7 a 3 días.....	59
Figura 31. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-7 a 28 días	60
Figura 32. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-7 a 28 días.....	61
Figura 33. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-16 a 3 días	62
Figura 34. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-16 a 3 días.....	63
Figura 35. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-16 a 28 días	64
Figura 36. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-16 a 28 días.....	65
Figura 37. Composición química en % atómico de PR del sistema 30% CaO -70% CBCA a 3 días de curado. a)Si-Ca-Al b)Al/Ca vs. Si/Ca	67
Figura 38. Composición química en % atómico de PR del sistema 30% CaO -70% CBCA a 28 días de curado. c)Si-Ca-Al d)Al/Ca vs. Si/Ca	68
Figura 39. Composición química en % atómico de PR del sistema 30% Ca(OH)_2 -70% CBCA a 3 días de curado. a)Si-Ca-Al b)Al/Ca vs. Si/Ca	69
Figura 40. Composición química en % atómico de PR del sistema 30% Ca(OH)_2 -70% CBCA a 28 días de curado. c)Si-Ca-Al d)Al/Ca vs. Si/Ca	70

Figura 41. Patrones de DRX de pastas de CaO/ CBCA.....	71
Figura 42. Patrones DRX de pastas de CaO/CBCA y Ca(OH) ₂ /CBCA	73
Figura 43. ATG y ATD del sistema CCA-7 a 3, 7, 14 y 28 días	75
Figura 44. ATG y ATD de CCA-5 y CCA-9 a 28 días	76
Figura 45. ATG y ATD del sistema CCA-16 a 3, 7, 14 y 28 días	76

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las estructuras de polisialatos y sus aplicaciones.....	9
Tabla 2. Factores que determinan la reacción de geopolimerización.....	11
Tabla 3. Composición química de la CBCA (% en peso)	14
Tabla 4. Datos consolidados del manejo de la CBCA 2008-2009	15
Tabla 5. Clasificación de la arena según su módulo de finura.....	21
Tabla 6. Análisis cuantitativo de la composición química de la CBCA (% en peso) antes de la molienda	25
Tabla 7. Análisis cuantitativo de la composición química de la CBCA (% en peso) después de la molienda.....	25
Tabla 8. Porcentajes acumulados de CBCA antes y después de la molienda	28
Tabla 9. Características químicas y físicas del Ca(OH) ₂	29
Tabla 10. Composición química del Ca(OH) ₂ (% en peso).....	29
Tabla 11. Características químicas y físicas del CaO	31
Tabla 12. Composición química del NaOH.....	31
Tabla 13. Propiedades físicas de la arena sílice	32
Tabla 14. Niveles de sustitución en peso Ca(OH) ₂ -CaO/CBCA	33
Tabla 15. Porcentaje en peso de Na ₂ O en forma de NH.....	33
Tabla 16. Niveles de T de Curado de pastas y morteros.....	34
Tabla 17. Arreglo ortogonal L ₉ para CBCA sustituida por CaO	35
Tabla 18. Arreglo ortogonal L ₉ para CBCA sustituida por Ca(OH) ₂	35
Tabla 19. Determinación del porcentaje de fluidez para pastas con CaO	41
Tabla 20. Determinación del porcentaje de fluidez para pastas con Ca(OH) ₂	41
Tabla 21. Incremento de la resistencia mecánica en morteros CaO/CBCA vs. morteros Ca(OH) ₂ /CBCA.....	47
Tabla 22. Niveles óptimos de los factores en estudio para morteros CaO/CBCA ..	50
Tabla 23. Niveles óptimos de los factores en estudio para morteros Ca(OH) ₂ /CBCA	53
Tabla 24. Formulaciones seleccionadas para su caracterización por MEB y EDS. 57	
Tabla 25. Valores promedios de las relaciones atómicas por EDS para el sistema CCA-7.....	66
Tabla 26. Valores promedios de las relaciones atómicas por EDS para el sistema CCA-16.....	68
Tabla 27. % de pérdida en peso de los sistemas CCA-7, 30%CaO/CBCA, CCA-16, 30%Ca(OH) ₂ /70%CBCA, CCA-5, 20%CaO/80%CBCA y CCA-9, 30%CaO/70%CBCA.....	77
Tabla 28. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% del sistema CaO-CBCA de la formulación CCA-7	109
Tabla 29. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% del sistema Ca(OH) ₂ -CBCA- de la formulación CCA-16.....	111

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Análisis granulométrico	89
Anexo 2. Módulo de finura.....	89
Anexo 3. Proporcionamiento de las formulaciones de pastas y morteros de CaO/CBCA y Ca(OH) ₂ /CBCA.....	90
Anexo 4. Serie de tamices y Ro-TaP utilizados para el análisis granulométrico del agregado fino.....	100
Anexo 5. Molino de atrición utilizado para la molienda de la CBCA	101
Anexo 6. Equipo de difracción láser para distribución de tamaño de partícula Marca HORIBA, modelo LA-950V2	101
Anexo 7. Mezcladora marca Hobart, modelo A200 capacidad de 5 L	102
Anexo 8. Mesa Vibrocompactadora marca CONTROLS, modelo CO159/Z0.....	102
Anexo 9. Moldes de Nylamid para pastas y morteros	103
Anexo 10. Horno de vacío marca VWR, modelo 1430-2	103
Anexo 11. Máquina de ensayo mecánico marca Elite, modelo QTEST/100	104
Anexo 12. Molino planetario marca Retsch	104
Anexo 13. Estufa para tratamiento térmico de morteros marca VWR Scientific modelo 1350 GM	105
Anexo 14. Mesa de fluidez para la determinación del porcentaje de fluidez de las pastas.....	105
Anexo 15. Analizador térmico diferencial gravimétrico simultáneo (Linseis L 70/2171, modelo Thyristor Power Supply ATD-TG)	106
Anexo 16. Microscopio Electrónico de Barrido marca Phillips modelo XL30ESEM	106
Anexo 17. Resistencia mecánica a la compresión de morteros CaO/CBCA	107
Anexo 18. Resistencia mecánica a la compresión de morteros Ca(OH) ₂ /CBCA..	107
Anexo 19. Resistencia mecánica a la compresión de morteros CaO/CBCA curados a 100°C y en agua y 100°C	108
Anexo 20. Resistencia mecánica a la compresión de morteros Ca(OH) ₂ /CBCA curados a 100°C y en agua y 100°C.....	108
Anexo 21. Cálculo de la composición química del geopolímero compuesto por Ca(OH) ₂ -CaO/CBCA de reactivos y productos.....	109

I. INTRODUCCION

Un geopolímero es un tipo de cemento de la familia de los químicamente activados. Estos se obtienen de la activación alcalina de materias primas de origen natural, artificial o de subproductos industriales, ricos en sílice y alúmina. Adicionalmente, estos deben tener un carácter amorfo para ser susceptibles a la disolución por medios alcalinos. Estos compuestos se han utilizado desde finales de los años 70 como materiales cementantes alternativos, ya que son capaces de endurecer y preservar sus propiedades mecánicas en condiciones ambientales adversas; adicionalmente, algunas formulaciones pueden presentar características químicas y mecánicas similares o superiores al CP.

En Nicaragua, el elevado precio de los materiales de construcción en conjunto con el alto porcentaje de personas con limitados recursos económicos, ocasiona que en gran parte del país exista un elevado déficit de vivienda, siendo el país con mayor índice de déficit habitacional a nivel centroamericano, presentando un déficit de vivienda de 957,000 mil unidades. De esas, 63.7 por ciento son casas que están en mal estado o les falta algún servicio (Alvarez & Galo, 2013). A nivel centroamericano Nicaragua es el segundo país de Centroamérica con el mayor precio de los combustibles y el incremento de estos se da cada semana, algo que disminuye la calidad de vida y ocasiona alzas en todos los sectores, incluyendo el sector de los materiales de construcción donde se emplea combustible fósil para la generación de energía que se necesita en el proceso de producción de cemento.

La construcción constituye una de las actividades más productivas del mundo y es uno de los principales consumidores de recursos económicos, energéticos y ecológicos. En la actualidad uno de los principales materiales para la construcción es el CP, en el cual se estima que por cada kg de cemento producido se emite al ambiente cerca de 1 kg de CO₂ (Escalante, 2002).

En este contexto se hace necesaria la búsqueda de alternativas de construcción ambientalmente amistosas, que no sólo contribuyan al desarrollo social, sino que también al desarrollo económico y al impacto ecológico positivo. Una de las medidas que podrían ser empleadas es la utilización de residuos industriales como sustitutos parcial o total del CP, entre los cuales está la CBCA.

La CBCA es un recurso con el cual se cuenta en el país, con la existencia de cuatro ingenios azucareros: Ingenio San Antonio, Ingenio Benjamín Zeledón, Ingenio Montelimar e Ingenio Monte Rosa, cada uno con su propia producción de CBCA. La ceniza que será utilizada en esta investigación procede del ingenio Pantaleón Monte Rosa. Actualmente en Nicaragua la ceniza de bagazo de caña de azúcar, no está siendo aprovechada, pues es uno de los desechos industriales generados en las calderas de los ingenios para la obtención de vapor sobrecalentado, que a su vez genera energía eléctrica.

La CBCA se puede considerar una puzolana artificial y se utiliza en la producción de cementos geopoliméricos, gracias a la activación alcalina en medio acuoso y al elevado contenido de sílice (SiO_2) presente en estas materias primas.

Durante las últimas décadas se han estado realizando estudios y aplicaciones sobre los materiales alternativos al CP, con el fin de elaborar un material cementoso con propiedades semejantes a éste y que mejore a la vez estas propiedades, entre las cuales cabe destacar la resistencia mecánica a la compresión, su comportamiento en ambiente agresivos, como ataques por HCl o por sulfatos, etc.

Se pretende con esta investigación maximizar el potencial que tienen los materiales alternativos mencionados con anterioridad, no solo desde el punto de vista de durabilidad, sino que también desde el punto de vista tecnológico e innovador en el país. Así como también se pretende la obtención de un material conglomerante o cementante denominado geopolímero o polímero inorgánico que pueda mermar el déficit de vivienda en el país, sin embargo el estudio económico de este se deja a disposición de futuras investigaciones.

II. ANTECEDENTES

Los primeros estudios sobre geopolímeros iniciaron en 1978, por J. Davidovits, quien utilizó por primera vez éste término (Davidovits, From Ancient Concrete to Geopolymers, 1993). Los geopolímeros están constituidos por una red tridimensional de silicoaluminatos. El proceso de polimerización involucra una reacción química bajo condiciones altamente alcalinas en minerales ricos en Al y Si produciendo enlaces poliméricos del tipo Si-O-Al-O (Bernal, Mejía de Gutiérrez, & Rodríguez, 2006). Según Davidovits *ésta terminología fue la clave para el éxito del desarrollo de nuevos materiales, estables a temperaturas de hasta 1250 °C y no inflamable, esto dio un gran impulso a la creatividad e innovación* (Davidovits, Geopolymer chemistry and applications, 2008).

Bernal y otros, en el 2006 desarrollaron una investigación titulada “Nuevos concretos para el aprovechamiento de un sub-producto industrial”, identificando el efecto de determinadas variables sobre la evolución microestructural de sistemas basados en cenizas volantes térmicas y alcalinamente activadas; y mostraron que el principal producto de reacción fue un gel de aluminosilicato amorfo con estructura tridimensional y, demostraron que factores como el tiempo, el tipo y concentración del activador usado y origen de las materias primas afectan el desarrollo microestructural de los “geopolímeros”.

En este contexto la sustitución parcial o total del CP por materiales alternativos, con propiedades cementosas que pueden obtenerse mediante activación térmica, mecánica y/o química, ha dado lugar a nuevos cementos compuestos, también conocidos como cerámicos químicamente enlazados. Los geopolímeros son un tipo de estos cementos, *“En estos últimos las reacciones químicas a temperatura ambiente son promovidas por una solución alcalina, la cual induce una o varias reacciones para obtener materiales cementicios con elevado desempeño mecánico y de alta durabilidad”* (Bernal, Mejía de Gutiérrez, & Rodríguez, 2006).

Criado y otros, en el año 2006 presentaron el estudio titulado “Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators”, y plantearon la sustitución parcial de cemento portland por ceniza de bagazo de caña, estudiando morteros con relaciones CP-CBCA: C1. 100-0, C2. 90-10, C3. 80-20 y C4. 70-30. Se midió el tiempo de fraguado inicial y final, RMC, la actividad puzolánica, masa específica, absorción de agua por inmersión y el índice de porosidad. El bagazo de caña utilizado tiene un rendimiento de CBCA del 10%, con 84%SiO₂ y 5% de carbono. Se comprobó la actividad puzolánica de la CBCA, y las composiciones C1, C2 y C3 mostraron retrasos de 10 min para el fraguado inicial. Los morteros con mayor proporción de ceniza fueron más porosos; por lo tanto mostraron mayores índices de absorción de agua. La sustitución de hasta 30% del CP no provocó variación significativa en la masa específica del mortero y hasta 20%CBCA no modificó la resistencia mecánica en 7 y 28 días de 47 MPa.

Jum y Kim en el año 2013, llevaron a cabo el estudio titulado “Use of CaO as an activator for producing a price competitive non-cement and structural binder using ground granulated blast furnace slag”, el cual estudió pastas base escoria granulada de alto horno y dos fuentes de Ca, Ca(OH)_2 y CaO, el contenido de activador se sustituyó en % en peso del aglutinante, el cual fue de 6.25% y se comparó el efecto de ambos activadores alcalinos sobre la RMC de pastas curadas a 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días para la producción del aglutinante, donde las pruebas mostraron que a los 56 días la RMC de las pastas donde se utilizó CaO fue de 53 MPa contra la de 24 MPa de las pastas donde se utilizó Ca(OH)_2 , y se concluyó que con el CaO como activador se obtienen mejores resultados de RMC que con Ca(OH)_2 y además los datos de RMC son comparables a las del CP.

Borrachero y otros, en el año 2013 presentaron la investigación “Use of Slag/Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) Blends in the Production of Alkali-Activated Materials”, en la cual se caracterizó la CBCA y se utilizó como activadores alcalinos las soluciones de NaOH y SiO_2 , se realizaron diferentes mezclas de EAH/CBCA de 0 a 40 % en peso y se midió la RMC, a 270 días de curado y 20°C, la cual arrojó un resultado de 60 MPa, de igual modo se realizaron evaluaciones microestructurales por medio de diferentes técnicas, DRX, MEB, pH, conductividad eléctrica, TGA, entre otras. Los resultados encontraron una buena estabilidad de las matrices desarrolladas por medio de la activación alcalina de la CBCA, siendo un recurso interesante para la obtención de ligantes alcalinos.

El trabajo de tesis presentado por Gaitán y Tórrez en el año 2013, titulado “Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar proveniente del Ingenio Monte Rosa sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de morteros de cemento tipo GU”, determinó el efecto sobre las propiedades mecánicas en morteros, con porcentajes de 15/85 y 45/55 respectivamente, evaluados a los 1, 3, 7, 14 y 28 días de curado, para los cuales se seleccionaron 4 cubos por edad de ensayo. Los resultados de RMC para cubos 15%CBCA entre los 1, 3 y 7 días fueron de 17, 22 y 24.5 MPa respectivamente; en cambio para los cubos 45%CBCA las RMC fueron bajas, presentándose a los 14 días de curado un valor entre los 12 y 13 MPa, pero los estudios del seguimiento de la reacción puzolánica en pastas, demostraron que existe en la matriz cementante al 45%CBCA, una gran cantidad de ceniza sin reaccionar y entre sus recomendaciones se encontró que, al pulverizar la CBCA se puede reemplazar al 100% el CP, debido al aumento en el área de contacto, lo que favorece el desarrollo de la reacción, dejando una brecha para posibles estudios con la CBCA.

En este estudio la gravedad específica para la CBCA se determinó por medio del desplazamiento de gasolina a través del matraz de Le Chatelier, obteniéndose un valor de 2.13 g/cm^3 y un área superficial de $2552 \text{ cm}^2/\text{g}$ determinada mediante permeabilidad al aire por el método de Blaine (Gaitán & Tórrez, 2013). Las fases cristalinas presentes en la CBCA se estudiaron mediante la técnica de DRX, donde se observaron *Albita Na* (AlSi_3O_8) y *Cristobalita* (SiO_2), la presencia del halo amorfo en $2\theta=15^\circ\text{-}38^\circ$, indica que la ceniza es predominantemente amorfa (Gaitán & Tórrez, 2013). En la **Figura 1** se observa lo descrito anteriormente.

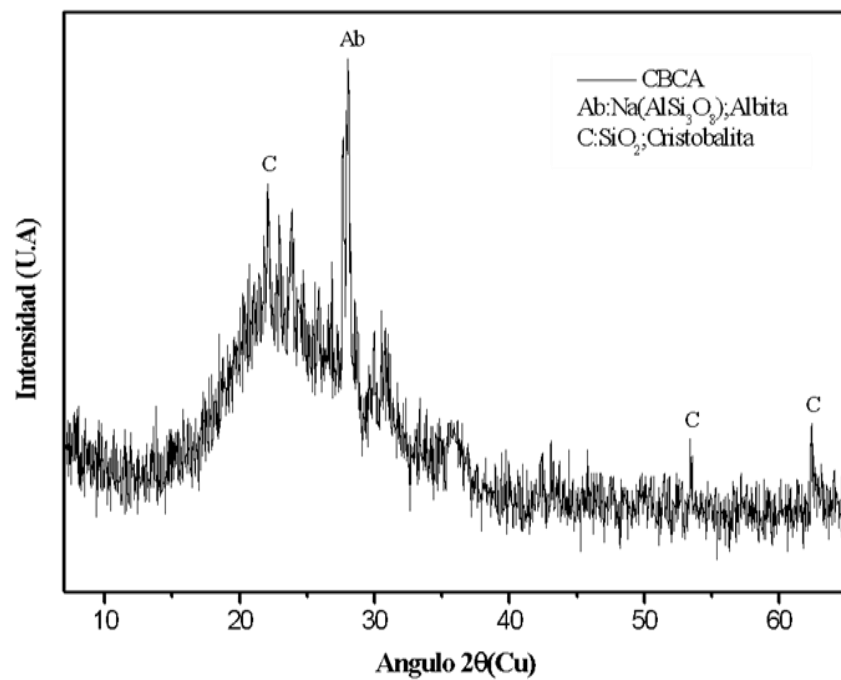


Figura 1. Patrón de DRX de la CBCA sin reaccionar

III. JUSTIFICACION

Se conoce que el concreto a base de cemento Portland es el segundo material, después del agua, más comercializado a nivel mundial; el consumo per cápita mundial de concreto es de 1-2 m³ por persona. Adicionalmente la producción de CP, que sobrepasa los 3,000 millones de toneladas anuales en el mundo, requiere de temperaturas de más de 1400°C; esto tiene un fuerte impacto ambiental ya que por 1 kg de CP se emite a la atmosfera 1 kg de CO₂ (Escalante, 2002).

Sin embargo para la producción de los geopolímeros no se requieren elevadas temperaturas, pudiendo algunos fraguar y endurecer a temperatura ambiente, lo que le confiere ser más barato y de menor impacto ambiental. Además, éstos pueden formularse usando residuos industriales, entre ellos la CBCA aprovechando sus características físicas y químicas, lo que evita el confinamiento de desechos y su conversión en materiales útiles. Esto representa una nueva vía en la obtención de materiales de construcción a bajo costo y con materias primas obtenidas de procesos industriales existentes en Nicaragua y reviste importancia nacional ya que se conoce que la emisión de CO₂ de la industria cementera representa a nivel nacional el 8.65% del total de todas las emisiones, mayor en comparación con el porcentaje de emisión a nivel mundial (5-7%), pudiendo sustituirse el cemento por un cemento verde, que mitigue las emisiones del país al medio ambiente.

El principal enfoque de este trabajo es crear una ruta de uso de la CBCA como sustituto total del CP mediante el proceso de activación química, puesto que representa una manera viable valorizar un desecho industrial de manera sustentable y con posibles ventajas económicas y sociales en la obtención de materiales de construcción, es por ello que se plantea en este trabajo la obtención de un geopolímero utilizando CBCA seca, tamizada y pulverizada, dos fuentes de calcio, Ca(OH)₂ y CaO, y activada con NaOH; y de esta manera determinar los productos de la reacción de geopolymerización mediante técnicas de caracterización, con esto se busca conocer si el producto que será obtenido podría ser implementado como material alternativo en la fabricación de viviendas de interés social y de esta manera mitigar el déficit de vivienda en el país.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Establecer el mecanismo y productos de reacción de cementos alcalinos producidos con ceniza de bagazo de caña de azúcar activada mediante hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), óxido de calcio (CaO) e hidróxido de sodio (NaOH), así como caracterizar las microestructuras y determinar las propiedades mecánicas de morteros producidos con dichos cementos.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la variación del porcentaje de óxido de sodio en niveles de 5, 10 y 15% adicionado en forma de hidróxido de sodio sobre la resistencia mecánica a la compresión de morteros curados a 20°C, 40°C y un tratamiento térmico de 20°C por 6 h-60°C por 12h y 20°C por 6 h.
- Evaluar el efecto de dos fuentes de calcio, Ca(OH)_2 y CaO en niveles de 10, 20 y 30%, en la matriz cementante sobre las propiedades mecánicas de los morteros de ceniza de bagazo de caña de azúcar curados a 20°C, 40°C y un tratamiento térmico de 20°C por 6 h-60°C por 12h y 20°C por 6 h, mediante ensayos de resistencia a la compresión a 28 días.
- Determinar el mecanismo y productos de reacción de formulaciones de pastas que presenten resistencia mecánica a la compresión alta en morteros, mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido y análisis térmico diferencial y termo-gravimétrico simultáneo.

V. MARCO TEORICO

5.1 Geopolímeros

5.1.1 Definición

Se define como geopolímero a un tipo de material cementante, que está compuesto por materiales mineralógicos silicoaluminatos, que son activados químicamente por soluciones alcalinas, por lo general a temperaturas inferiores a los 200°C, compuestos primordialmente por sílice y alúmina (Caballero & Sánchez, 2010).

El término se le atribuye a Joseph Davidovits, quien en los años 80 lo empleó para hacer referencias a aquellos polímeros sintéticos inorgánicos de silicoaluminatos, generados de la reacción química conocida como geopolimerización. Los geopolímeros se han utilizado últimamente como materiales cementantes alternativos, ya que presentan buenas características químicas y mecánicas que son comparables a las del CP (Davidovits, From Ancient Concrete to Geopolymers, 1993).

5.1.2 Estructura

Los geopolímeros están formados por redes 3D (tridimensionales) amorfas de polisialatos $(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-)_n$, donde n es el grado de polimerización, la red sialato consiste de una serie de tetraedros alternados de SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos compartidos de oxígeno, estos tienen gran estabilidad térmica y química, no inflamables, con buenas propiedades mecánicas (Beleña, Tamayo, & Tendaro, 2004). La **Figura 2** muestra la estructura de la red sialato.

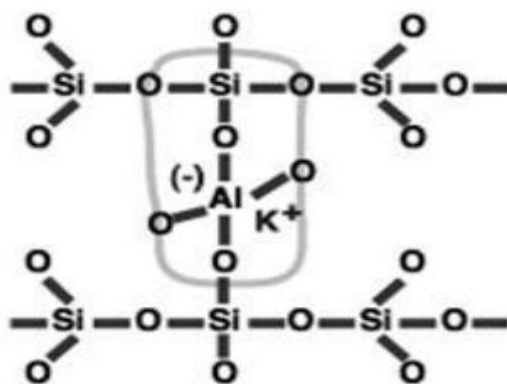
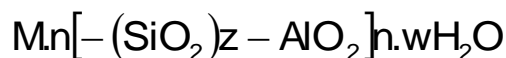


Figura 2. Estructura de la red sialato

La red sialato debe contener iones positivos (Na^{+1} , K^{+1} , Li^{+1} , Ca^{+2} , Ba^{+2} , NH_4^{+} , H_3O^{+}) para contrarrestar las cargas negativas de Al^{+3} (la red sialato presenta carga negativa debido a la sustitución de Si^{4+} con Al^{+3}), debe de existir una compensación o balance de las cargas, a esto se debe la presencia de los iones positivos, para que el aluminio pueda unirse a 3 átomos de oxígenos, como lo hace el Silicio. La fórmula empírica de los polisialatos es como sigue:



Ecuación 1. Fórmula empírica de los polisialatos

Donde **M** corresponde a cualquiera de los cationes mencionados (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{+2} , Ba^{+2} , NH_4^+ , H_3O^+), **n** es el grado de polimerización, **z** que puede ser 1, 2 o 3 y determina el tipo de geopolímero resultante, si **z** es igual a 1 la red será del tipo polisialato, si **z** es 2 la red será poli (sialato-siloxo) y si **z** es 3 la red será poli (sialato-disiloxo), y **w** es el número de moléculas de agua asociadas.

La clasificación realizada por Davidovits de los tipos de polímeros $-Si-O-Al-$ se basa en el número de átomos de Si sustituidos por el Al y son las siguientes: PS (poli-sialato), PSS (polisialatosiloxo) y PSDS (polisialatodisoloxo).

La **Tabla 1** muestra un resumen de las estructuras de los polisialatos, así como sus correspondientes aplicaciones.

Tabla 1. Clasificación de las estructuras de polisialatos y sus aplicaciones

Clasificación	Estructura monomérica	Aplicación
PS (poli-sialato) Si:Al =1:1	$Mn-(Si-O-Al-O)_n$	<ul style="list-style-type: none"> • Aislamiento térmico • Resistencia al fuego
PSS (polisialatosiloxo) Si:Al =2:1	$Mn-(Si-O-Al-O-Si-O)_n$	<ul style="list-style-type: none"> • Refractarios para fundición de Al • Cementos de alto rendimiento • Residuos tóxicos
PSDS (polisialatodisoloxo) Si:Al =3:1	$Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)_n$	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos resistentes al fuego • Material de herramientas para su uso en el rango de temperaturas de 600-1000°C

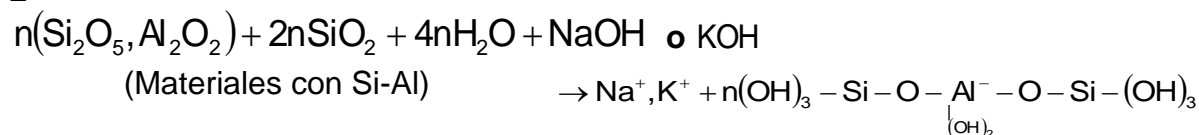
Fuente: (Davidovits, From Ancient Concrete to Geopolymers, 1993)

5.1.3 Mecanismo de reacción

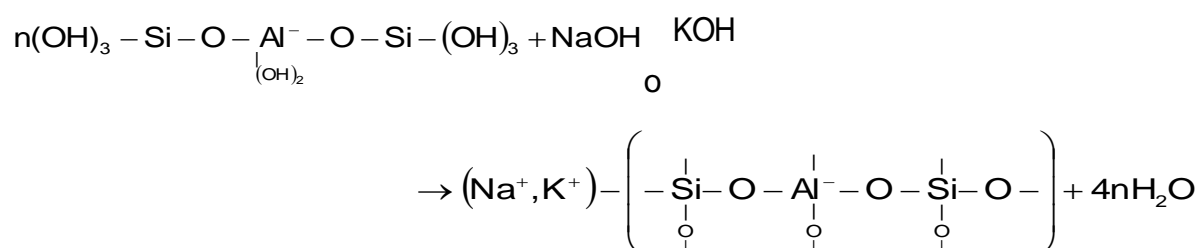
La reacción de geopolimerización o geosíntesis es aquella que se da cuando por medio de una solución alcalina, que por lo general es NaOH y agua se activa un compuesto rico en sílice y alúmina, generalmente en condiciones ambientales para dar lugar a una red polimérica de polisialatos que son compuestos activos de aluminosilicatos, con propiedades cementantes y múltiples características, que confieren a este compuesto un alto valor agregado. El mecanismo exacto de esta reacción aún no se ha determinado; pero se conoce que la síntesis es llevada a

cabo por medio de oligómeros, los cuales proveen las estructuras unitarias de la red macromolecular tridimensional.

El proceso geopolimérico puede representarse esquemáticamente en la **Ecuación 2**



Precursor geopolimérico (1)



Columna geopolimérica (2)

Ecuación 2. Esquema de formación del material geopolimérico descrito por Davidovits

Fuente: (Caballero & Sánchez, 2010)

La reacción de geopolimerización es un proceso complejo, ya que implica una serie de etapas análogas y simultáneas que se describen a continuación:

1. **Disolución:** En esta etapa se disuelven las fases de Si y Al presentes en la materia prima por efecto de la hidrólisis alcalina y generando compuestos activos de aluminosilicatos o silicoaluminatos.
2. **Polimerización:** En esta etapa las especies disueltas activas forman una mezcla compleja, donde por balances estequiométricos se determina la cinética de las reacciones de activación y propiedades finales del producto formado.
3. **Gelificación:** En esta etapa se da la correspondiente formación del gel de los polímeros de la mezcla compleja sobresaturada de aluminosilicatos, para obtener esta mezcla debe transcurrir cierto tiempo y está en dependencia también de la concentración del activador alcalino, así como la reactividad de las materias primas y las condiciones de activación.
4. **Condensación:** En esta etapa ocurre el fraguado y endurecimiento de las geles, formándose redes tridimensionales amorfas.
5. **Solidificación:** Las geles de aluminosilicatos se solidifican

Se ha mencionado que las fuentes de materias primas así como la concentración y tipo de activador alcalino juegan un papel fundamental en la reacción de geopolimerización, así como en las propiedades del producto final, ciertos autores han determinado los siguientes factores que determinan la reacción geopolimerización, los cuales se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Factores que determinan la reacción de geopolimerización

Fuente Primaria	<ol style="list-style-type: none"> 1. Composición química 2. Mineralogía 3. Microestructura 4. Distribución de tamaño de partícula
Activador Alcalino	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alcalinidad 2. Tipo y naturaleza 3. Relación Si/Catión 4. Relación Especies iónicas/Catión

Fuente: (Rodríguez A. , 2010)

5.2 Activación alcalina

La activación alcalina se define como un proceso químico en el cual un compuesto en polvo rico en sílice y aluminio, sea natural o artificial, es mezclado con una disolución alcalina ($\text{pH} > 7$) para producir una pasta que puede fraguar y endurecer como lo hace el CP. El mecanismo de reacción que ocurre en este proceso no está hasta la fecha totalmente definido; pero el proceso está mayormente ligado a las materias primas ricas en sílice y alúmina y al tipo de activador alcalino (Parra, 2011).

La activación alcalina se experimentó por primera vez por Purdon, utilizando NaOH como activador y ceniza de alto horno. Según Palomo, dos modelos de activación alcalina pueden ser establecidos, siendo el primero el caso de la activación de la EAH (Silicio+Calcio) con una solución medianamente alcalina y teniendo como principal producto de reacción, silicatos de calcio hidratados (CSH) y el segundo modelo de activación alcalina es el de metacaolín (Silicio+Aluminio) con una solución entre medio y altamente alcalina, dando como producto de reacción un modelo polimérico de alta resistencia mecánica.

Los activadores alcalinos ejercen la función de solubilizar la fuente de aluminosilicatos, favorecer la formación de hidratos solubles y así formar una estructura compacta con estos hidratos. Los activadores que se utilizan por lo general suelen ser alcalinos o alcalinotérreos, tales como hidróxidos (ROH , R(OH)_2), sales de ácido débil (R_2CO_3 , R_2S , RF), sales de ácido fuerte (Na_2SO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y sales silícicas del tipo $\text{R}_2\text{O}_{(n)} \text{SiO}_2$, donde R es un ion alcalino del tipo Na, K o Li. Los activadores comúnmente utilizados son los NaOH e KOH, silicatos y carbonatos (Rodríguez E. , 2009). La estructura formada es una pasta, la cual puede asentar y endurecer en un corto período de tiempo tal y como lo hace el CP.

5.2.1 Hidróxido de sodio como activador alcalino

El NaOH también conocido como soda cáustica es un sólido blanco, cristalino e higroscópico, al entrar en contacto con el agua produce una reacción exotérmica.

La concentración del activador alcalino ocupa un papel fundamental en el proceso de geopolimerización, ya que la solubilidad de los aluminosilicatos, incrementa con el aumento de la concentración del ión alcalino, a su vez que incide de manera positiva en la resistencia mecánica del geopolímero. La concentración óptima de NaOH aún no está clara; sin embargo en (Rodríguez E. , 2009) se reporta comportamiento contrario, variando las concentraciones del activador alcalino de 12 M a 18 M, obteniéndose mejores resultados de RMC para los materiales a la primera concentración.

5.3 Variables que intervienen en la síntesis de geopolímeros

El estudio de los geopolímeros desde 1978 por Joseph Davidovits, ha permitido determinar ciertas variables experimentales que afectan de manera directa la síntesis de geopolímeros, entre las cuales 3 variables importantes, que se toman en cuenta en la presente tesis se presentan a continuación:

- Contenido de agua
- Temperatura y tiempo de curado
- Composición química

5.3.1 Contenido de agua

El contenido de agua es importante para lograr una trabajabilidad y consistencia adecuada de la matriz geopolimérica; puesto que a mayor contenido de agua aumenta la trabajabilidad y homogeneidad de la estructura a obtener; pero a su vez disminuye la resistencia mecánica, debido al aumento de la concentración de iones OH^- . Consecuentemente puede darse un incremento de la segregación de los activadores alcalinos, provocado por el contenido de agua, generando heterogeneidad en el sistema. Siendo así el contenido de agua, una de las variables críticas en la síntesis de geopolímeros.

5.3.2 Temperatura y tiempo de curado

Las condiciones de temperatura y tiempo de curado hasta ahora reportadas son variadas y en algunos casos resultan contradictorias; sin embargo los estudios iniciales de Davidovits proponían temperaturas de curado inferiores a 100°C , pero estudios recientes demuestran que la temperatura de curado puede variar entre 40 , 60 y 85°C y está en dependencia también del material precursor del geopolímero (Baladrán, 2011).

El tiempo de curado está intrínsecamente relacionado con la temperatura de curado, ya que ambos son importantes en el desarrollo de buenas propiedades

mecánicas en los sistemas geopoliméricos. Este varía desde 24 h hasta la fecha última de ensayo de resistencia mecánica (1, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 360 días, 2 y 5 años).

5.3.3 Composición química

La composición del material de partida para la síntesis de geopolímeros, aún no se encuentra estandarizada, ya que la composición del sistema geopolimérico estará en dependencia de la composición inicial de las materias primas. Sin embargo ciertos estudios refieren que la composición de las MP se elige de acuerdo a la relación $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$, donde M corresponde a un catión como el Na^+ o K^+ (Balandrán, 2011). Al incrementar esta relación en el límite permitido de acuerdo a las MP conlleva a los siguientes efectos:

1. Aumento de la resistencia mecánica a la compresión
2. Retardo en los procesos de fraguado y curado
3. Disminución de la cristalinidad y aumento en la homogeneidad de los productos de reacción.

5.4 Puzolanas

Según la ASTM C- 618 la puzolana es *“un material silíceo o sílico aluminoso que por sí solo posee muy poco o ningún valor cementante; pero que finamente pulverizado y en presencia de agua, reaccionará químicamente con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a temperatura ambiente, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes* (Annual Book of ASTM Standards, 1998).

La puzolana fija la cal, combinándose químicamente con ella, formando compuestos cementantes y evitando que pueda reaccionar con cualquier agente agresivo como los sulfatos. La reacción con la cal es tardía, es decir empieza cuando se ha liberado el NaOH , lo que genera menor calor de hidratación que el CP.

5.4.1 Clasificación

Las puzolanas se clasifican de diferentes maneras; pero según su origen, en primera instancia estas son:

- Puzolanas naturales
- Puzolanas artificiales

Las puzolanas naturales son principalmente rocas o tierras y abarcan dos grandes grupos:

- Rocas volcánicas, donde la formación de vidrio amorfo se produce por fusión. Dentro de este grupo se encuentran las cenizas volcánicas y piedra pómez.

- Rocas o tierras que contienen ópalos, entre las que se encuentran las rocas de sílice, las diatomitas, las pizarras y algunas arcillas.

Las puzolanas artificiales, se obtienen como subproductos de distintos procesos industriales y agrícolas. Dentro de este grupo se encuentran:

- Cenizas volantes, se obtienen de la combustión de carbón mineral (lignito) en las plantas térmicas generadoras de energía eléctrica.
- EAH, obtenida de la fundición de materiales ferrosos en los altos hornos de las industrias dedicadas a fundir metales y aleaciones.
- Arcillas cocidas, elaboradas con arcilla ordinaria de color mate rojizo, se someten a temperaturas mayores a 800 °C.
- Cenizas de residuos agrícolas, como la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza de hoja de maíz, la CBCA, las cuales son sometidas a un proceso de combustión, a través del cual se obtiene una materia prima rica en sílice y alúmina.

5.4.1.1 Ceniza de bagazo de caña de azúcar

La ceniza se obtiene producto de la calcinación del bagazo de caña de azúcar en las calderas, donde se utiliza para la generación de energía eléctrica. La composición química de la CBCA se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Composición química de la CBCA (% en peso)

ZrO ₂	Cl	SrO	MnO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PPI	SiO ₂
0.006	0.017	0.031	0.095	0.395	0.399	0.509	1.15	1.59	3.556	4.145	4.921	6.726	14.13	62.33

El estudio de la composición química de la CBCA se obtuvo mediante la técnica de FRX (Gaitán & Tórrez, 2013). El contenido de SiO₂ para la CBCA es de 62.33 % y el de Al₂O₃ es de 6.726%, es un compuesto silicoaluminato. La composición química de la ceniza de bagazo de caña varía de acuerdo al tipo de terreno de donde se obtuvo, la edad de la caña, así como las condiciones a las cuales ocurrió la combustión.

La CBCA se caracteriza por ser un producto amorfo, la cual presenta actividad puzolánica, reacciona con Ca(OH)₂ para formar silicatos de calcio hidratado de naturaleza cementosa. La cantidad de ceniza en el bagazo depende de la influencia de los suelos y de la cantidad de material extraño que se haya recogido durante la cosecha. El contenido de ceniza en el bagazo se considera moderado, en condiciones de poca lluvia son de 2% a 4% del bagazo total y en época de lluvia estos valores son del 12% al 15% (Ríos, 2011).

Las condiciones de quema del bagazo influyen en las propiedades de la ceniza, en un estudio reciente se encontró que el bagazo atraviesa varias modificaciones en su estructura (Rodríguez A. , 2010). En la **Figura 3** se muestra que a condiciones

de temperatura de 400-500°C para el bagazo de caña de azúcar, se obtiene una CBCA amorfa, con un contenido alto en sílice, lo que convierte a la CBCA en un posible sustituto del CP a estas condiciones de quema.






	A 100°C se presenta una pérdida inicial de masa, resultante de la evaporación de agua absorbida.
	A 350°C Inicia una ignición del material más volátil, aquí es donde inicia la quema del bagazo.
	Entre 400° a 500°C el carbón residual y los óxidos se forman, se observa una pérdida más importante de masa, después de esta etapa la ceniza se convierte en amorfa, rica en sílice.
	El uso de temperaturas por arriba de los 700°C puede llevar a la formación de cuarzos, y niveles aún más elevados de temperatura, pueden crear otras formas cristalinas.
	Encima de los 800°C, el sílice presente en la ceniza del bagazo de caña de azúcar es esencialmente cristalino.

Figura 3. Proceso de modificación del bagazo en la quema

Las condiciones de quema del bagazo influyen en las propiedades de la CBCA, la cantidad y forma de sílice dependen no sólo de la temperatura de quema del bagazo sino del tiempo de quema. Estudios han demostrado que someter el bagazo a una temperatura de quema de 500 a 680°C por menos de un minuto, da como resultado una sílice totalmente amorfa, y que las condiciones de quema influyen en el grado de cristalinidad y el área de superficie específica de las partículas de CBCA, propiedad estrechamente relacionada con la reactividad de la CBCA (Rodríguez A. , 2010).

5.4.1.1.1 Fuente de la CBCA

La CBCA utilizada proviene del Ingenio Pantaleón Monte Rosa, las calderas de este ingenio están provistas de un sistema lavador de gases para las chimeneas de las calderas, que incluye un proceso de separación de cenizas del agua. En el manejo de la CBCA para la zafra de 2008-2009 se utilizó un área de 1.7 Ha, en la cual fue depositada. En la actualidad la CBCA es utilizada como abono, una vez finalizada la zafra, se procede a la compactación de la ceniza y a su posterior recubrimiento con suelo y especies rastreras. Los datos de la cantidad de CBCA depositadas para este periodo de zafra se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Datos consolidados del manejo de la CBCA 2008-2009

Días de zafra	Peso de CBCA con humedad (Ton)	Peso de CBCA sin humedad (Ton)
147	53,879.11	44,719.66

En el Ingenio La Grecia, ubicado en Honduras, el cual es parte de Corporación Pantaleón, con la ceniza del carbón resultado de la generación de energía eléctrica en el período de no zafra, se está analizando la posibilidad de negociar con algunas cementeras del país para que utilicen esta ceniza como parte de la mezcla para la fabricación de cemento, además una parte de esta se utiliza actualmente para reparación de caminos secundarios dentro de la finca de caña.

5.5 Aditivos

La Norma ASTM C 125 define al aditivo como: “Un material distinto del agua, de los agregados y cemento hidráulico que se usa como componente del concreto o mortero. Las dosis en las que se utilizan los aditivos, están en relación a un pequeño porcentaje del peso de cemento, con las excepciones en las cuales se prefiere dosificar el aditivo en una proporción respecto al agua de amasado”.

La utilización de los aditivos inició con el concreto romano, se conoce que se añadía sangre y clara de huevo a los concretos. Según la Norma ASTM C 494-84 los aditivos presentan la siguiente clasificación, de acuerdo al uso que se le desee dar en la mezcla para concreto o mortero (Gaspar, 1984).

Tipo A (Aditivos reductores de agua), se emplean en la mezclas de hormigón de CP para reducir la cantidad de agua de amasado con el fin de conseguir una consistencia dada.

Tipo B (Aditivos retardadores), se emplean para retrasar el fraguado del CP en el hormigón.

Tipo C (Aditivos acelerantes), se emplean para acelerar el fraguado y el desarrollo de las RMC iniciales del hormigón.

Tipo D (Aditivos reductores de agua y retardadores), en esta categoría están los aditivos del tipo A y B.

Tipo E (Aditivos reductores de agua y acelerantes), en esta categoría están los aditivos del tipo A y tipo C.

Tipo F (Aditivos reductores de agua de alta actividad), se emplea para reducir la cantidad de agua de amasado necesaria para conseguir una consistencia dada en una cantidad igual o superior al 12%.

Tipo G (Aditivos reductores de agua de alta actividad y retardadores), en esta categoría están los del tipo F y tipo B

5.5.1 La Cal

Se llama cal, a todo producto, sea cual fuere su composición y aspecto físico, obtenido de la calcinación de piedras calizas, obteniéndose diferentes tipos de

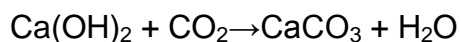
cales como consecuencia de la variada composición química que presenta la piedra caliza.

La cal es uno de los materiales de construcción de uso extendido desde hace más de 10,000 años; pero quienes se perfeccionaron en su utilización como aditivo a la cal viva de cenizas volcánicas ricas en sílice fueron los romanos, produciendo de esta manera un material que fraguaba bajo el agua, a diferencia de la cal viva sin ninguna adición, que no fraguaba más que al aire.

El ciclo de la cal empieza con la explotación de roca caliza (CaCO_3), posteriormente la cal es triturada y calcinada en hornos de calcinación a 900°C , obteniéndose la cal viva (CaO). La reacción química que ocurre es la siguiente



El CaO es inestable, reacciona con el H_2O , formándose así el Ca(OH)_2 , esta reacción es exotérmica. Liberando alrededor de 15,100 calorías. La cal hidratada se utiliza en mezclas de pastas, y tiene la propiedad de endurecerse lentamente en el aire, enlazando los cuerpos sólidos, empleándose como aglomerante. El endurecimiento recibe el nombre de fraguado y se debe primeramente a una deshidratación por evaporación del agua con la cual se formó la pasta, y después, ocurre una recarbonatación:



El CO_2 es absorbido por el Ca(OH)_2 , de la atmósfera, y de esta manera se reconstituye la caliza de la cual se partió (Villarino, 2010).

5.6 Pastas y morteros

Una pasta es una mezcla de agua más un aglomerante y se dice que es de consistencia normal cuando la cantidad de agua de amasado es igual a la cantidad de huecos del aglomerante suelto (Carmona, 2011).

Según la NMX-C-021-ONNCCE-2004, el mortero es el material finamente pulverizado que puede contener uno o más de los materiales siguientes: Clinker Portland, cualquier tipo de cemento especificado en la Norma NMX-C-414-ONNCCE, piedra caliza, arcilla, puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y yeso.

El mortero es el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado, que al agregarle agua y arena, tiene la propiedad especial de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo.

El cemento para albañilería (mortero) al mezclarse con arena y agua, produce morteros con características especiales que son utilizados para el pegado de

tabiques, enjarres, repellados, aplanados, trabajos decorativos, etc. (Edificación, 2004)

En la **Figura 4** de manera general se muestra como están compuestas las pastas y los morteros.

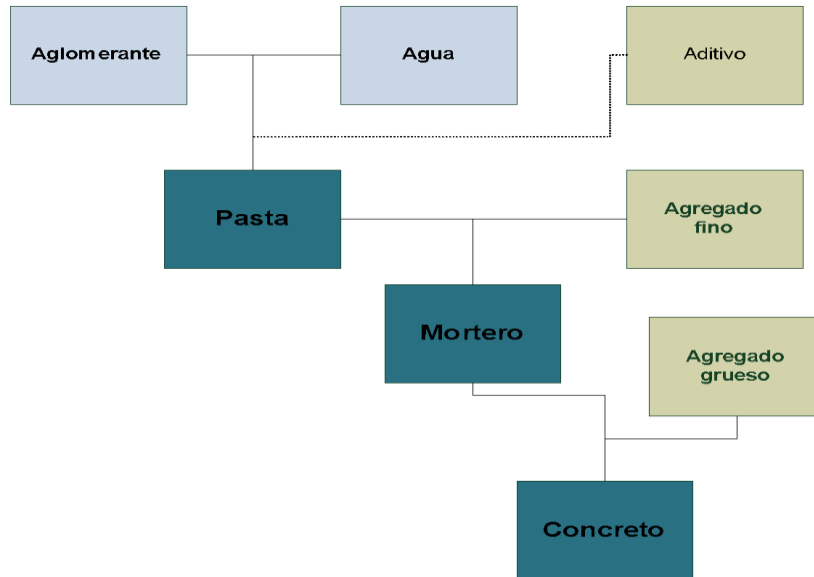


Figura 4. Compuestos de pastas y morteros

La clasificación de los morteros es la siguiente:

- Morteros hidráulicos: Están constituidos por un aglomerante que es cal o cemento, y arena, la propiedad característica de estos morteros es su alta RMC, además de la capacidad de fraguar bajo el agua, pero tienen poca flexibilidad, lo que provoca una mayor ruptura. Los principales morteros de este tipo, son cemento-arena y yeso-arena.
- Morteros aéreos: Estos morteros están constituidos por aglomerantes que fraguan con el aire, por lo general son mezclas de arena-cal y arena-barro.

5.7 Técnicas de caracterización

La caracterización de materiales es la obtención de información a partir de la respuesta de un material al ser perturbado por una señal. La caracterización se hace necesaria, porque permite conocer o predecir las propiedades de un material y así valorar la utilidad en diferentes aplicaciones. Las técnicas permiten conocer la composición química, estructura, morfología, propiedades (color), topología así como la topografía y a su vez como varía la composición de un material que se somete a tratamiento térmico.

5.7.1 Técnicas de caracterización físico-química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar e $\text{Ca}(\text{OH})_2$

5.7.1.1 Difracción de Rayos

Los Rayos X son una forma de radiación electromagnética de elevada energía y pequeña longitud de onda, del orden de los espacios interatómicos de los sólidos. La DRX es uno de los fenómenos que se produce al interaccionar un haz de rayos X con una determinada longitud de onda, con un material sólido cristalino, siendo la luz dispersada en todas direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos o iones que se encuentran en el trayecto; pero el resto del haz de rayos X con una disposición ordenada de átomos (

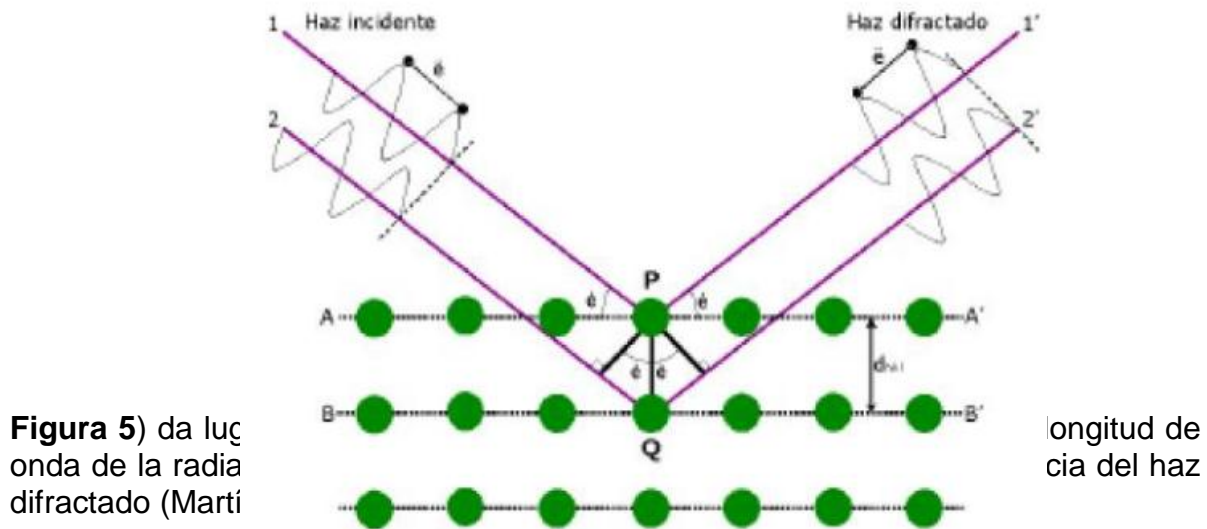


Figura 5) da luz
onda de la radiación
difractada (Marti

longitud de
cia del haz

Figura 5. Interacción de los Rayos X con los átomos

Fuente: (Martínez, 2011)

La geometría que se presenta en el proceso de DRX cuando se analizan sustancias cristalinas, es similar al que se presenta en la reflexión de la luz por un espejo plano, y la condición necesaria para que una familia de planos paralelos reparados regularmente, refracte un haz incidente de rayos X, se conoce como la ecuación de Bragg (**Ecuación 3**) la cual predice la dirección en que se da la interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal.

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

Ecuación 3. Ecuación de Bragg

Donde **d**= es la distancia entre los planos de la red cristalina, **θ**= es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión, **λ**= es la longitud de onda de los rayos X y **n** es un número entero.

La DRX permite la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Entre los estudios con esta técnica se encuentran: Estudios de polimorfismo, transiciones de fase, medidas del tamaño de partícula, determinación de diagramas de fase, etc.

5.7.1.2 Espectrometría de Difracción por rayos láser

La técnica de difracción por rayos láser consiste en hacer pasar una mezcla pulverizada en seco o suspendida en un líquido no reactivo, a través de un rayo láser monocromático. La teoría de J. Fraunhofer explica que se origina una figura de difracción en el detector, lo que permite obtener el análisis granulométrico de las partículas. El rayo láser formará una figura de difracción cuya energía de distribución sigue la Ley de AIRY.

5.7.1.3 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X

La técnica de fluorescencia de rayos X se utiliza para determinar qué elementos químicos y concentraciones de los mismos constituyen una muestra. Es un método analítico de alta precisión, con la ventaja de ser no destructivo en la mayoría de las aplicaciones y de poder preparar la muestra de manera simple. El fundamento está basado en las transiciones de electrones de los átomos que se producen cuando una radiación electromagnética de cierta energía incide con el material en estudio, produciéndose así una excitación en el átomo el cual pasa de un estado basal (estable) a otro de mayor energía (inestable) de lo que resultan transiciones en diferentes estados energéticos en el átomo, los cuales son únicos para cada átomo en particular (Camacho & Meléndez, 2009).

5.7.2 Técnicas de caracterización del agregado fino

5.7.2.1. Análisis granulométrico

El agregado fino está estandarizado bajo la norma ASTM C-778, el análisis granulométrico, es una prueba que se hace al agregado para conocer la distribución de las partículas de diferentes tamaños, los cuales generalmente se expresan en términos de porcentajes acumulados en las aberturas de mallas.

5.7.2.2. Módulo de finura

El módulo de finura es un índice adimensional, que indica las proporciones de los diferentes tamaños de partículas del material, es decir proporción de finos y gruesos.

Los tamices que se utilizan para determinar el módulo de finura son: **No.100, No.50, No.30, No.16, No.8 y No.4 y No.3/8**. Los porcentajes retenidos o acumulados en las mallas se suman y se divide el total entre 100, obteniéndose así el módulo de finura.

El cálculo para el porcentaje retenido se determina por medio de la **Ecuación 4**.

$$\%RM = \frac{PRM}{Pm} * 100$$

Ecuación 4. Cálculo del porcentaje retenido

Donde **%RM**: es el porcentaje retenido en mallas, **PRM**: es el peso retenido en cada malla en gramos y **Pm**: es el peso de la muestra en gramos.

Las arenas se clasifican de acuerdo al módulo de finura según la **Tabla 5**.

Tabla 5. Clasificación de la arena según su módulo de finura

Tipo de arena	Módulo de finura
Gruesa	2.9-3.2
Media	2.2-2.9
Fina	1.5-2.2
Muy fina	<1.5

5.7.3 Técnicas de caracterización en pastas frescas

5.7.3.1 Determinación de fluidez

El ensayo de fluidez es una prueba física que se hace a la mezcla en su estado fresco. La fluidez de una pasta o mortero se relaciona directamente con la trabajabilidad que dicha mezcla posea, la cual tiene que ver con la facilidad en que se pueda manejar la mezcla sin que se produzcan problemas de segregación, con el tiempo en que la mezcla se pueda trabajar sin que fragüe, la facilidad de colocación y la capacidad que posee la mezcla para retener el agua en contacto con superficies absorbentes (Caballero & Sánchez, 2010).

La fluidez es el incremento del diámetro de la base de la masa de la pasta, expresado como % del diámetro de la base original (102.34 mm). El diámetro considerado del mortero debe ser el promedio de por lo menos 4 mediciones de diámetro de 45° aproximadamente.

El cálculo del porcentaje de fluidez se determina por medio de la **Ecuación 5**.

$$\% \text{defluidez} = \frac{\left[\frac{D1 + D2 + D3 + D4}{4} \right] - D_i}{D_i} * 100$$

Ecuación 5. Cálculo del porcentaje de fluidez

Donde **D1, D2, D3, D4**: son las 4 mediciones del diámetro de 45° de la pasta en mm y **D_i**; es el diámetro inicial de la pasta antes de los golpes en mm.

5.7.4 Técnicas de caracterización en pastas endurecidas

5.7.4.1 Análisis térmico diferencial y termo-gravimétrico simultáneo

El ATD-ATG simultáneo es la técnica de uso más extendido dentro de las técnicas simultáneas debido a su naturaleza complementaria. El ATG permite estudiar procesos que llevan asociada una variación en el peso de la muestra, mientras que el ATD es más versátil y puede detectar cualquier proceso que se produce con un cambio de energía. El ATG proporciona resultados que son intrínsecamente cuantitativos mientras que el ATD sólo algunos equipos permiten medidas cuantitativas; pero los resultados obtenidos por ATD son muchos más dependientes de las condiciones experimentales que el ATG.

El análisis térmico diferencial da una idea de las transformaciones físico-químicas que tienen lugar en una sustancia determinada, y a la temperatura a la que dichas transformaciones aparecen. Es una técnica en la cual se miden diferencias entre las propiedades de una muestra y las de un material de referencia. Los equipos se basan en la medida de la diferencia de temperatura entre la muestra y un material de referencia, cuando las dos especies están sujetas a dos regímenes de temperatura, en un ambiente calentado o enfriado a velocidad controlada. El material no debe sufrir transformaciones en el rango de temperatura en que se realiza el estudio.

El registro obtenido indica si la sustancia es térmicamente activa en el rango de temperatura seleccionado, mediante la aparición de una serie de picos cuya posición depende fundamentalmente de la composición química y estructura cristalina de la sustancia, y cuya superficie está relacionada con la energía envuelta en la reacción que está ocurriendo. La forma de los picos es función de la velocidad de calefacción, de la cantidad de muestra, y del tipo de proceso. Se obtienen generalmente picos finos cuando son procesos físicos, mientras que los procesos químicos producen picos más gruesos. (Conesa, 2000)

5.7.4.2 Microscopia Electrónica de Barrido

El microscopio electrónico de barrido es una técnica de análisis de observación de todo tipo de materiales, tanto orgánicos como inorgánicos, que mediante el recorrido, a modo de barrido, de un haz muy fino de electrones a gran velocidad, que se genera mediante un filamento de wolframio sometido a un alto voltaje y aumentando su temperatura, sobre una superficie de un material, lo caracteriza morfológicamente, y mediante los adecuados accesorios permite efectuar un adecuado microanálisis elemental. (Martínez, 2011)

El haz de electrones en la muestra se encuentra bajo vacío y con un recubrimiento de oro o grafito. El vacío permite una mejor estabilidad al haz de electrones, debido a que son absorbidos por la atmósfera y para evitar ionización de gases. Los electrones que interactúan con las muestras son recogidos en diferentes sensores, dependiendo del análisis a realizar.

El microscopio consiste en un sistema que permite crear y desviar un haz de electrones, así como medir las variaciones del parámetro escogido, denominado coeficiente de emisión electrónica secundaria, también consta de un dispositivo que permite la reconstrucción del objeto y grabarla. La fenomenología básica en que se fundamenta esta técnica se basa, en el momento en que los electrones, dotados de una energía de algunos kilovatios, chocan contra una materia sólida se emiten electrones de energías diversas así como también una cierta radiación (Martínez, 2011).

5.7.5 Ensayo físico-mecánico en mortero endurecido

5.7.5.1 Determinación de la resistencia mecánica a la compresión

La prueba de resistencia mecánica a la compresión consiste en aplicar un esfuerzo máximo que pueda soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La RMC se determina dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión, mediante la **Ecuación 6** (Gaitán & Tórrez, 2013).

$$R = \frac{P_{\max}}{S}$$

Ecuación 6. Resistencia mecánica a la compresión

Donde, **R**= Resistencia mecánica a la compresión, kg/cm² o Pa, **P_{max}**= Carga máxima indicada por la máquina, kgF y **S**= Área de la sección transversal, cm². Para el cálculo de la RMC, se hará uso de la **Ecuación 7**:

$$R = \frac{10 * Q}{a * b} * 9.806$$

Ecuación 7. Cálculo de la RMC en MPa

Donde Q es la carga soportada por el cubo (kgf), a es la dimensión del lado a del cubo (mm), b es la dimensión del lado b del cubo (mm) y 9.806 es el factor de conversión de kgf/mm^2 a MPa.

VI. HIPOTESIS

El desarrollo de esta investigación está dirigido al estudio de la utilización de un desecho industrial, como lo es la CBCA con el fin de obtener un geopolímero, que sea utilizado como material de construcción, el cual desarrolle similares o mejores características mecánicas y físicas que los existentes.

La sustitución total de CP por CBCA utilizada como ligante en la matriz geopolimérica, desarrolla mejores resistencias mecánicas y físicas que aquellos donde es sustituido parcialmente.

VII. METODOLOGIA

En el presente capítulo se describe el programa experimental desarrollado y la caracterización de las materias primas utilizadas, CBCA, CaO e Ca(OH)_2 , así como sus métodos de preparación.

Se plantean 3 etapas principales en la realización de la tesis, las cuales se muestran en la **Figura 6**.

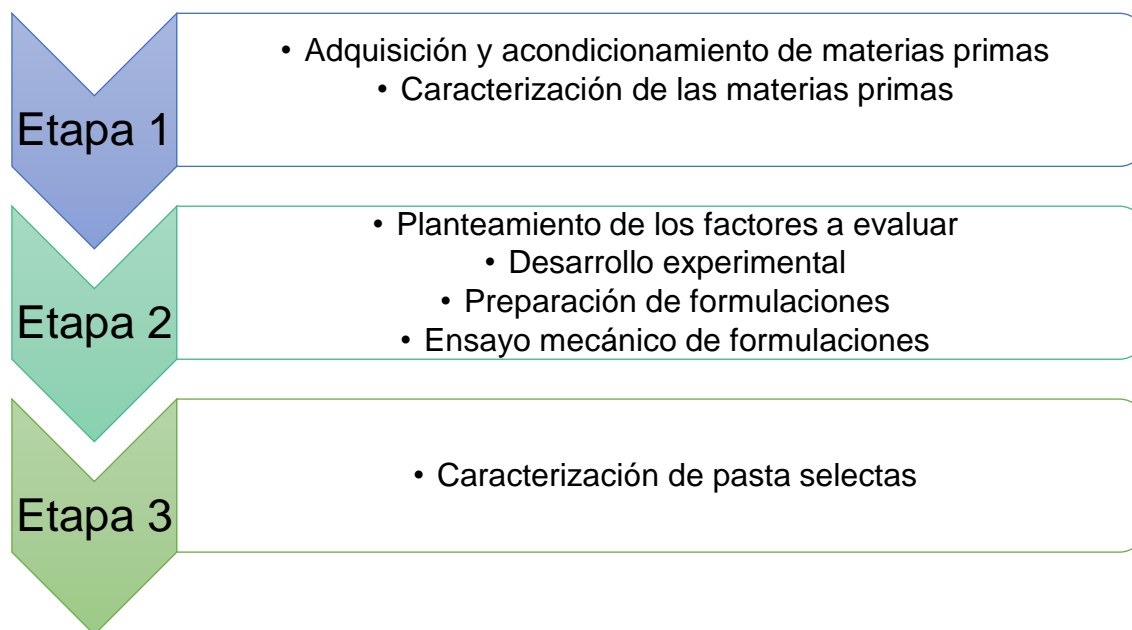


Figura 6. Esquema de metodología empleada en la tesis

7.1 Acondicionamiento y caracterización de materias primas

7.1.1 Lugar de desarrollo

La caracterización de las propiedades físicas y químicas de la CBCA así como de las otras materias primas se llevó a cabo mediante técnicas experimentales disponibles los Laboratorios del Cinvestav-IPN, Unidad Saltillo, México.

7.1.2 Materiales

7.1.2.1 Ceniza de bagazo de caña de azúcar

Debido a las condiciones de humedad que presentaba la CBCA, se secó en un horno por 24 h a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, para ello se tomaron lotes de 500 g, siendo el % de humedad de agua evaporable de 65.6% en peso.

La CBCA se hizo pasar por un tamiz de malla 100 (abertura nominal de 0.150 mm), con el fin de eliminar el porcentaje de inquemados (bagazo que no quemó), el % de retenidos para un lote de 200 g fue de 26%. Así mismo se sometió a activación mecánica en un molino de acero con bolas del mismo material, con un diámetro de bolas de 9/32 pulgadas con el fin de reducir el tamaño de partícula e incrementar su superficie específica, aumentando así el grado de reactividad de la CBCA. La relación bolas/carga en peso utilizada fue de 25:2 y el tiempo de molienda fue de 15 min.

La CBCA fue analizada por método Semicuantitativo en Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X con dispersión de longitud de onda, para lo cual se utilizó un equipo Marca BRUKER Modelo S4 PIONNER, el cual está provisto de una fuente de excitación de 4kW, la interpretación de los datos se realizó utilizando el software SPECTRA plus, todo esto se realizó en el laboratorio de Análisis Químico del Cinvestav-IPN. La **Tabla 6** muestra que de acuerdo al análisis la CBCA está mayormente constituida por SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . Este análisis se realizó antes de la molienda.

Tabla 6. Análisis cuantitativo de la composición química de la CBCA (% en peso) antes de la molienda

ZrO_2	ZnO	SrO	MnO	Cl	Na_2O	TiO_2	SO_3	MgO	P_2O_5	CaO	K_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	PPI	SiO_2
0.005	0.034	0.045	0.148	0.153	0.199	0.508	0.753	0.765	1.560	3.984	4.521	5.020	10.740	18.260	53.310

Se realizó el mismo análisis de FRX a la CBCA pulverizada, la **Tabla 7** muestra el cambio en la composición de la CBCA, la cual se aprecia mayormente en el % de SiO_2 , se obtuvieron mayores PPI, la muestra de CBCA se sometió a condiciones de quema a 950°C por 1 h. Al ser activada mecánicamente la CBCA se vuelve mayormente reactiva por el aumento de la finura, lo que trae consigo un cierto incremento del desorden de la estructura cristalina y al ser calcinada a 950°C , demuestra que el contenido de SiO_2 en la CBCA es reactivo, lo que indica que la CBCA tiene una estructura amorfa. El porcentaje alto de PPI se atribuye a la

mezcla del líquido lavador de gases y el agua residual del lavado de la caña de azúcar, la cual contiene una alta cantidad de materia orgánica. Debido a la molienda de la ceniza, se liberó el carbono presente en la muestra y la técnica es más exacta, por lo que la composición química de la CBCA molida es la verdadera.

Tabla 7. Análisis cuantitativo de la composición química de la CBCA (% en peso) después de la molienda

SrO	MnO	Cl	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MgO	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	PPI	SiO ₂
0.034	0.121	0.250	0.150	0.321	1.130	0.584	1.480	3.951	3.602	2.940	10.580	47.750	27.110

Los resultados del análisis químico de la CBCA se completaron con la identificación de las fases presentes antes y después de la activación mecánica, mediante la técnica de DRX en un Difractómetro Phillips modelo D-Expert 3040 utilizando radiación Cu K α (1.542 Å) y voltaje de excitación de 40 kV e intensidad de corriente de 30mA. Las condiciones de operación fueron: $2\theta=5-70^\circ$, paso de $2\theta=0.03^\circ$ y tiempo de incidencia de 3 s/paso, donde se obtuvo el difractograma mostrado en la **Figura 7**. Las fases cristalinas encontradas fueron *Albita* ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y *Anortita* ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), la presencia del halo amorfo en $2\theta=20^\circ$ y 37° , indica la estructura amorfa de la CBCA.

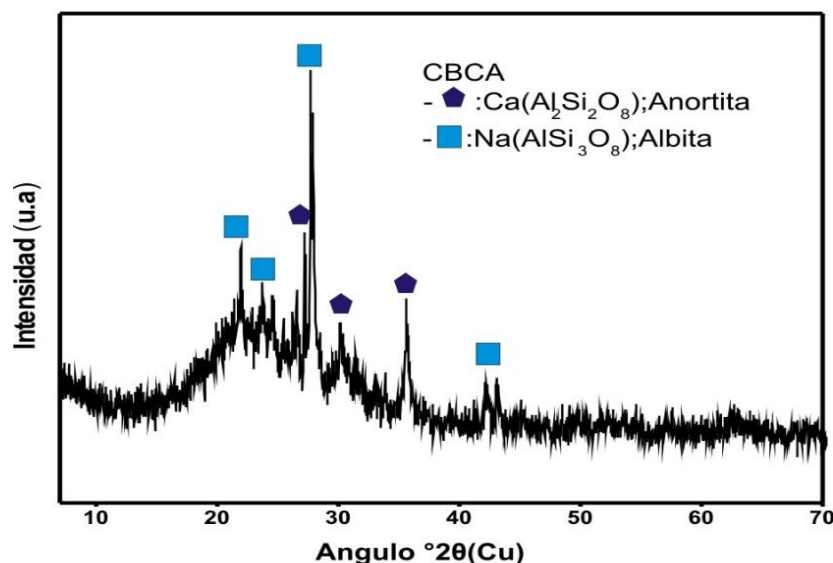


Figura 7. Patrón de DRX de la CBCA antes de la activación mecánica

Se realizó el mismo análisis a la CBCA después de la activación mecánica, obteniéndose el difractograma mostrado en la **Figura 8**, esto se realizó con el fin de observar si existen cambios en la estructura cristalina de la CBCA. Las fases presentes en la CBCA fueron las mismas *Albita* y *Anortita*, a pesar de que los porcentajes de alúmina y sílice disminuyeron, las fases cristalinas siguen estando presentes. El halo amorfo se encuentra en $2\theta=20^\circ$ y 40° , por lo que la CBCA sigue siendo predominantemente amorfa.

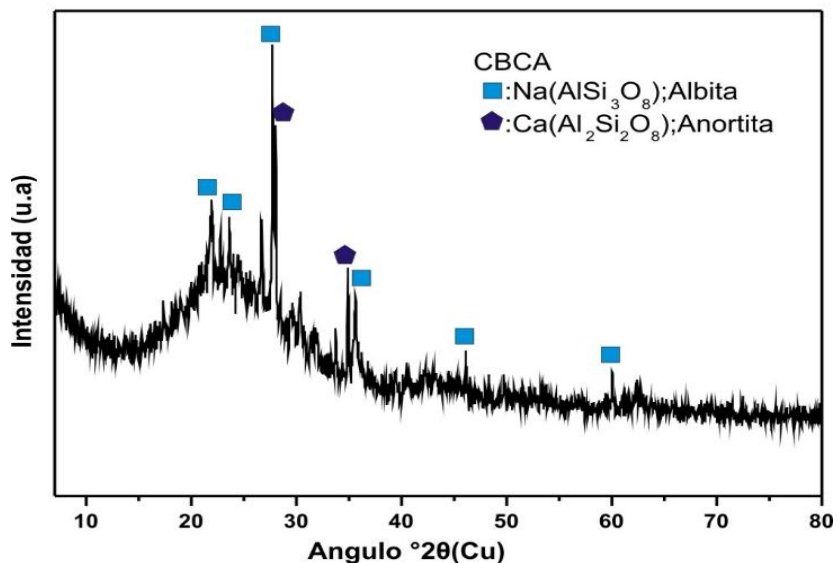


Figura 8. Patrón de DRX de la CBCA después de la activación mecánica

En la **Figura 9** se muestran las fotomicrografiías de la CBCA sin reaccionar, las cuales se obtuvieron de un MEB marca Phillips modelo XL30ESEM, la muestra previo al análisis se montó en cinta de grafito. La morfología de las partículas irregulares de la CBCA se observan en forma de bastones, esferas y semiesferas, y estructura porosa.

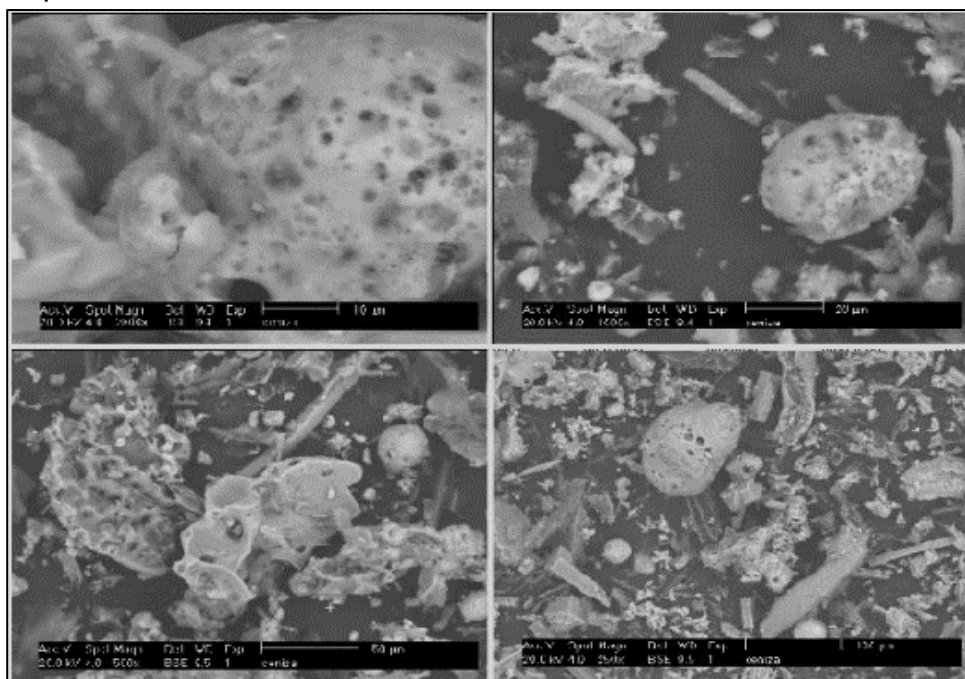


Figura 9. Fotomicrografiías de la CBCA

El análisis puntual de la composición química de la CBCA sin reaccionar se obtuvo mediante EDS, previo al análisis, la muestra fue montada en resina y desbastada

con lijas No. 500, 800, 1000 y 1200, y pulida con pasta de diamante de 3 micras y 1.5 micras utilizando metanol como lubricante. En la

Figura 10 se observa que la CBCA contiene Si en altas concentraciones y en menor contenido Al y Ca.

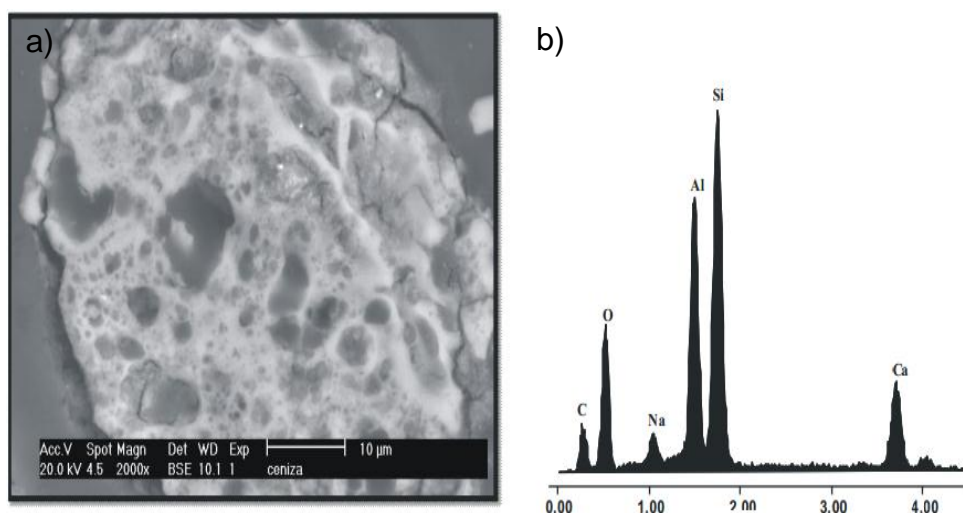


Figura 10. CBCA sin reaccionar a) Micrografía y b) Espectro

Se realizó el análisis de difracción láser a la CBCA antes de la molienda, en un analizador de tamaño de partícula modelo LA- 950V2, presentando la CBCA un tamaño promedio de partícula de 57.001 µm, de igual manera se realizó el mismo análisis para la CBCA después de la molienda, el diámetro de partícula promedio de la CBCA para este análisis fue de 23.92 µm. Se puede observar que hubo un efecto en el tamaño de la partícula de la CBCA, ya que en comparación con la **Figura 11** existen en los mismos % acumulados, menores diámetros de partículas.

La distribución de tamaño de partícula de la CBCA se presenta en la **Figura 11**.

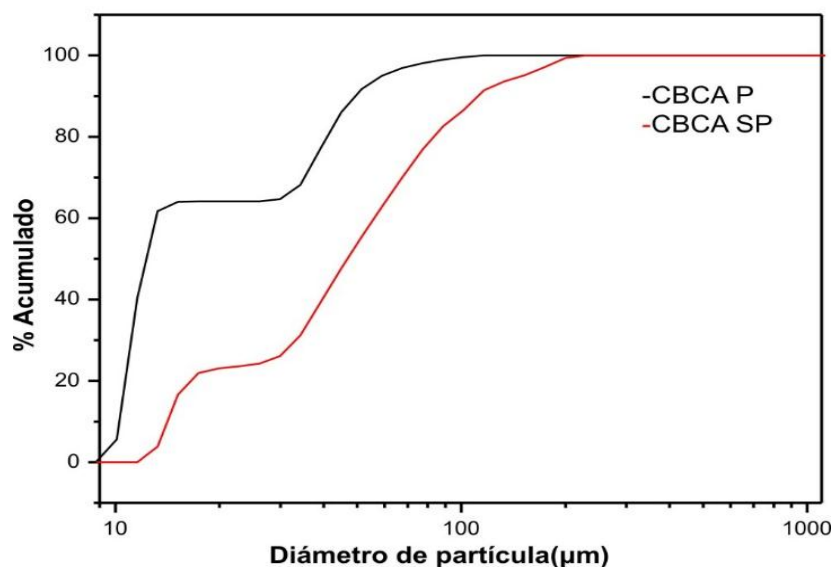


Figura 11. Distribución de tamaño de partícula de la CBCA antes y después de la molienda

Los porcentajes de acumulados para el análisis antes y después de la molienda se presentan en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Porcentajes acumulados de CBCA antes y después de la molienda

Volumen Acumulado (%)	Diámetro de partícula (μm) antes de la molienda	Diámetro de partícula (μm) después de la molienda
10	14.173	10.283
25	27.661	10.917
50	46.921	12.326
75	74.611	38.012
90	111.890	49.504

7.1.2.2 Hidróxido de Calcio

Se utilizó cal hidratada proveniente del grupo Calidra de México, marca piracal, cuyas características químicas y físicas están en la **Tabla 9**. Las especificaciones fueron brindadas por el Grupo Calidra de México.

Tabla 9. Características químicas y físicas del Ca(OH)_2

	Compuesto	%
--	-----------	---

Características Químicas	Ca(OH) ₂	86
	Al ₂ O ₃	≤0.40
	Fe ₂ O ₃	≤0.14
	MgO	≤1.00
	SO ₃	≤1.00
	SiO ₂	≤1.00
Características Físicas	Distribución granulométrica	% Retenido
	mallá # 200	6.0
	mallá #100	0.0
	Densidad	560 kg/m ³

La cal hidratada es el nombre comercial del hidróxido de calcio, que se forma al agregarse agua al óxido de calcio para que una vez apagada (hidratada) pueda utilizarse. En el apagado exotérmico se desprende gran cantidad de calor que evapora parte del agua utilizada. La cal “apagada” tiene un volumen tres veces mayor que el de la cal viva (Calidra, 2011). Esta es la más común para la construcción de mamposterías, morteros, acabados, aplanados e impermeabilización y pinturas de bajo costo.

Se realizó además el análisis de la composición del Ca(OH)₂ mediante la técnica de FRX en el laboratorio de Análisis Químico del Cinvestav, la cual se muestra en la **Tabla 10**. Se puede observar que los compuestos que contiene mayoritariamente son el CaO, MgO y SiO₂.

Tabla 10. Composición química del Ca(OH)₂ (% en peso)

ZrO ₂	K ₂ O	SrO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	MgO	PPI	CaO
0.001	0.032	0.052	0.082	0.084	0.130	0.460	0.693	26.110	72.360

Se realizó el análisis de las fases que componen al Ca(OH)₂ mediante la obtención del difractograma por DRX que se muestra en la **Figura 12**. Las fases encontradas correspondieron a *Portlandita*, Ca(OH)₂, y *Calcita* (CaCO₃). La presencia de estas dos fases es producto de la hidratación del CaO para obtener el Ca(OH)₂.

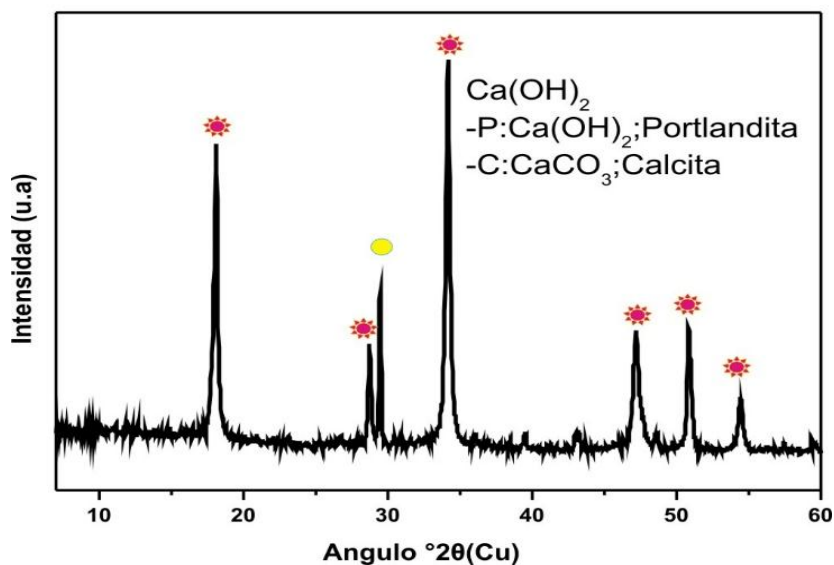


Figura 12. Patrón de DRX del Ca(OH)_2

Se realizó el análisis de distribución de tamaño de partícula para el Ca(OH)_2 , dando como resultado la gráfica mostrada en la

Figura 13. El diámetro promedio de partícula fue de 18.03 μm .

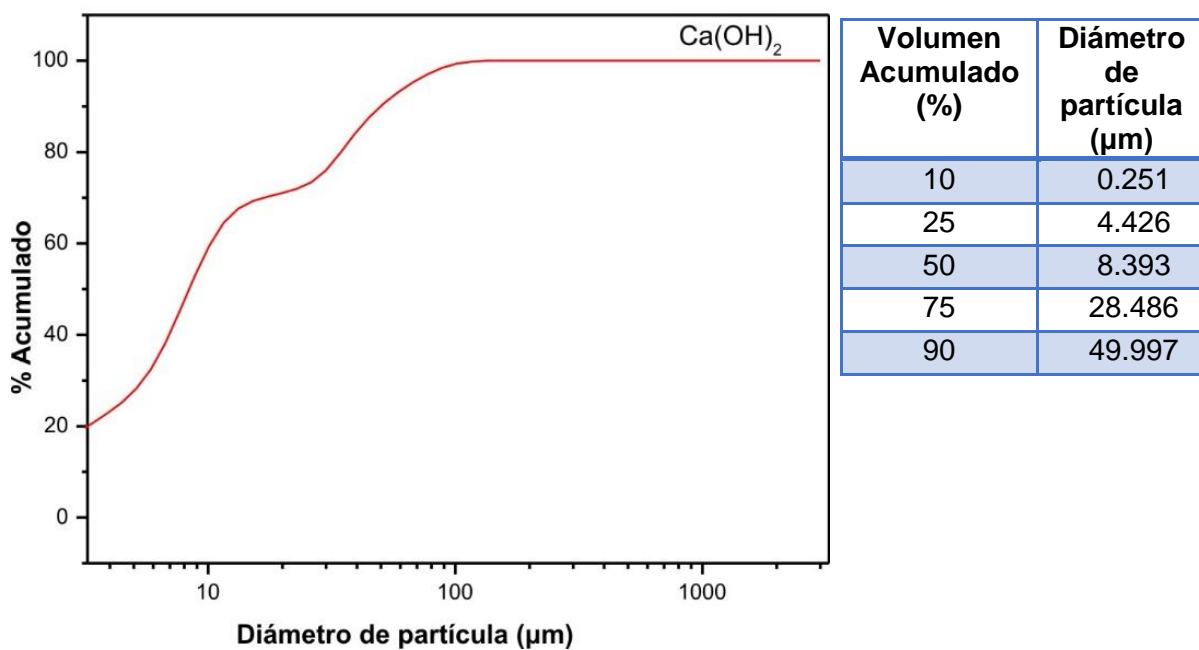


Figura 13. Distribución de tamaño de partícula del Ca(OH)_2 **7.1.2.3 Oxido de Calcio**

El CaO se sustituyó en % en peso de la CBCA. Las características químicas y físicas se listan en la **Tabla 11**. Las especificaciones fueron brindadas por el Grupo Calidra de México.

Tabla 11. Características químicas y físicas del CaO

Características Químicas	Compuesto	% en peso
	CaO	75.0
	CaCO ₃	20.0
	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	0.5
	MgO	2.0
	SO ₃	≤0.8
	SiO ₂	2.0
Características Físicas	Granulometría típica para distribución	1.4"-0"
	Reactividad	ΔT 30 °C, 20 min, ASTM C-110
	Densidad	1200 kg/m ³

7.1.2.4 Agua de mezclado

Para la preparación de las pastas y morteros se utilizó el agua potable, proveniente del Laboratorio de Cementos del Cinvestav-IPN, Ramos Arizpe, Coahuila, México. La relación en peso de agua/ligante ocupa un factor importante al momento de obtener la trabajabilidad y consistencia de las pastas. La cantidad de agua de mezclado se debe tener en cuenta, puesto que influye en la RMC de los morteros.

7.1.2.5 Hidróxido de sodio

El NaOH es una base fuerte, que al entrar en contacto con el agua reacciona vigorosamente, ocurriendo una reacción exotérmica. Este fue adquirido en escamas a nivel comercial grado analítico en IQUISA, México. El NaOH está compuesto por Na₂O y H₂O, la función del NaOH en la preparación de las formulaciones será la modificación del %Na₂O. De esta manera se incorpora mayor %Na₂O soluble y de manera teórica se beneficia la trabajabilidad de las pastas. La adición de NaOH incrementa la velocidad de disolución de la sílice contenida en algunos materiales usados como reemplazo parcial o total del CP, lo cual

incrementa la reactividad total del cemento. Las especificaciones fueron brindadas por el proveedor y se presentan en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Composición química del NaOH

Componente	% en peso
Na ₂ O	77.5
H ₂ O	22.5

7.1.2.6 Agregado fino (pétreo)

Los agregados (finos y gruesos) ocupan del 60 al 75% en peso del volumen del mortero o concreto. El agregado que se utilizó proviene de la planta Ottawa, Illinois, es arena sílice grado estándar, la cual cumple con la norma ASTM C-778.

Las propiedades físicas de esta arena y las normas que se utilizaron para su determinación se muestran en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Propiedades físicas de la arena sílice

Propiedad Física	Valor	Norma NMX
MEss(kg/dm ³)	2.88	NMX-C-165-1984
Msss(kg)	0.325	NMX-C-165-1984
% de Absorción	17.33	NMX-C-165-1984
Módulo de finura	1.84	NMX-C-111-ONNCCE-2004

La curva granulométrica del agregado fino utilizado se determinó siguiendo la norma NMX-C-077-1997-ONNCCE y se muestra en la **Figura 14**.

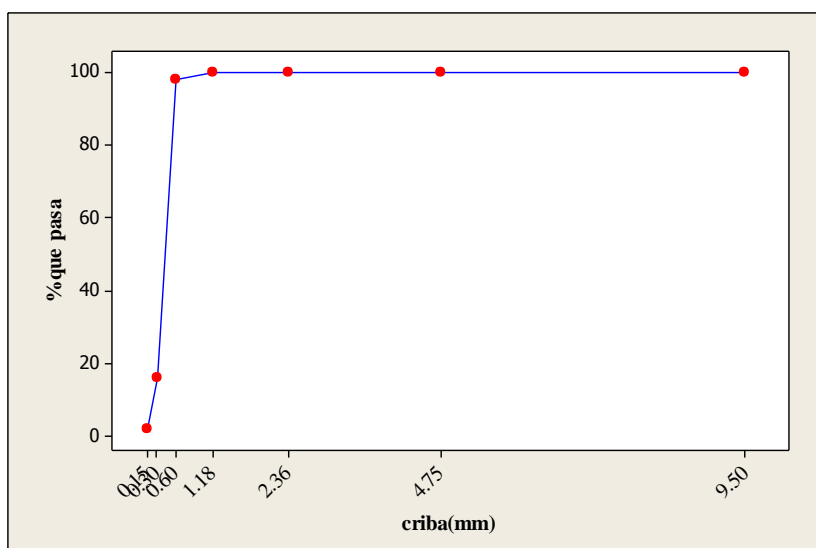


Figura 14. Curva granulométrica de del agregado fino (arena sílice)

La **Figura 14** muestra que el 100% de la arena de sílice pasó por las mallas de mayor diámetro, y según su módulo de finura que fue de 1.84 indica que es una arena fina.

7.2 Métodos

7.2.1 Planteamiento de los factores de estudio

Se elaboraron pastas y morteros, según especificaciones de la NMX-C-085-ONNCCE-2002, de dimensiones de 2.54 cm de lado, de CBCA activada con una solución de NaOH, con Ca(OH)_2 y CaO (según fue la formulación) en % en peso de la CBCA, los morteros además de lo descrito anteriormente, contenían en la matriz geopolimérica arena sílice

Se realizó el análisis de tres factores de estudio para determinar las características del geopolímero óptimas a la prueba de RMC. La interacción de las variables con mayor efecto y sus niveles, repercuten en las propiedades mecánicas de los cementos alcalinos.

→ Niveles de sustitución en peso de Ca(OH)_2 -CaO/CBCA

Para la mezcla geopolimérica de pastas y morteros se sustituyó la CBCA a diferentes % en peso por la fuente de Ca. Los niveles sustituidos se muestran en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Niveles de sustitución en peso Ca(OH)_2 -CaO/CBCA

% en peso Ca(OH)_2 -CaO	% en peso CBCA
10	90
20	80
30	70

→ Porcentaje en peso de Na_2O con respecto al peso de CBCA

El Na_2O se incorporó a la matriz geopolimérica en forma de NaOH, de este modo se varió su concentración, los niveles de estudio para este factor se presentan en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Porcentaje en peso de Na_2O en forma de NaOH

% en peso de Na_2O

5
10
15

→ Temperatura de curado

Con el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura de curado sobre las propiedades mecánicas de las pastas y morteros se curaron a 3 rangos de temperatura, para evaluar el efecto que tiene este factor con respecto al avance de la RMC, los niveles se muestran en la **Tabla 16**. El curado a 20°C, permite un desarrollo gradual de las reacciones, favoreciéndose una buena consolidación microestructural. La temperatura a 40°C representa un término medio entre la temperatura de 20 y 60°C, se permite desarrollo gradual de las reacciones, al mismo tiempo de adquirir temprana resistencia mecánica, mientras que a 60°C (o a vapor) se alcanzan altas resistencias a edades tempranas. El tratamiento térmico de dos temperaturas se realizó 6 h a 20°C, 12 h a 60°C y 6 h a 20°C, siendo en total 24 h de fraguado.

Tabla 16. Niveles de T de Curado de pastas y morteros

T de Curado (°C)
20
40
20-60-20

7.2.2 Diseño experimental

El desarrollo del diseño de experimentos se hizo con la metodología de Taguchi, estos diseños al igual que la metodología clásica están basados en arreglos ortogonales de 8 corridas. El método Taguchi utiliza técnicas estadísticas para mejorar procesos y productos. La idea del diseño de experimentos de Taguchi es la optimización, por medio de la identificación de los factores que afectan en cuanto a su magnitud y variabilidad a una variable de respuesta.

La metodología de Taguchi se enfatiza en los siguientes aspectos:

- **Diseño Robusto:** Es la búsqueda del juego de condiciones para lograr el comportamiento del proceso óptimo.
- **Minimización de la función de pérdida:** Se busca minimizar la pérdida económica, debido a las corridas en condiciones no óptimas.
- **Maximización de la señal razón a ruido:** Es el alcance de las mejores condiciones del proceso bajo razones no controlables (ruido).

La nomenclatura de los experimentos propuestos y contenido de cada una de las variables de interés se muestran en la **Tabla 17** y **Tabla 18**, se seleccionaron dos

arreglos ortogonales Taguchi L_9 , en cada una de los arreglos se cambió la fuente de Ca incorporada a la matriz geopolimérica.

Tabla 17. Arreglo ortogonal L_9 para CBCA sustituida por CaO

	%CaO	%Na ₂ O	T Curado(°C)	%Ceniza
CCA-1	10	5	20	90
CCA-2	10	10	40	90
CCA-3	10	15	20-60-20	90
CCA-4	20	5	40	80
CCA-5	20	10	20-60-20	80
CCA-6	20	15	20	80
CCA-7	30	5	20-60-20	70
CCA-8	30	10	20	70
CCA-9	30	15	40	70

Tabla 18. Arreglo ortogonal L_9 para CBCA sustituida por Ca(OH)₂

	%Ca(OH) ₂	%Na ₂ O	T Curado(°C)	%Ceniza
CCA-10	10	5	20	90
CCA-11	10	10	40	90
CCA-12	10	15	20-60-20	90
CCA-13	20	5	40	80
CCA-14	20	10	20-60-20	80
CCA-15	20	15	20	80
CCA-16	30	5	20-60-20	70
CCA-17	30	10	20	70
CCA-18	30	15	40	70

7.2.3 Preparación de sistemas

7.2.3.1 Preparación de pastas

Se prepararon pastas de CaO/CBCA y de Ca(OH)₂/CBCA. Los sistemas de pastas fueron para 18 formulaciones, a una pasta por fecha, las fechas de estudio fueron

1, 3, 7, 14 y 28 días. El total de pastas que se preparó fue de 108 cubos. En la preparación de las pastas se siguió la siguiente metodología:

1. Se pesaron las materias primas.
2. Se mezcló la CBCA con la fuente de Ca en seco.
3. Se agregó la solución activadora a la mezcla, CBCA + Fuente de Calcio.
4. Los componentes se mezclaron a razón de 5 minutos aproximadamente.
5. Se determinó el porcentaje de fluidez de cada una de las formulaciones en la mesa de fluidez.
6. Se llenaron los moldes de Nylamid de dimensiones de 2.54 cm de lado.
7. Las pastas recién elaboradas se vibraron por un tiempo de 10 segundos con el fin de eliminar burbujas de aire presentes.
8. Los moldes cubiertos con un film plástico y paños húmedos se introdujeron a la cámara isotérmica de 20°C, 40°C por 24 h y las de tratamiento térmico se dejaron 6 h a 20°C, 12 h a 60°C y 6 h a 20°C, que suman 24 h.
9. Después del fraguado se desmoldaron y se mantuvieron en la cámara isotérmica de curado correspondiente para cada sistema envueltas con paños húmedos, permaneciendo a esa temperatura hasta las edades de estudio.

7.2.3.1.1 Ensayo de fluidez

El ensayo de fluidez se realizó a cada una de los sistemas. Para realizar esta prueba se siguió la NMX-C-061-ONNCCE-2001.

Este ensayo se realizó en una mesa de fluidez, la cual consiste en una mesa plana, construida de tal manera que pueda dejarse caer a una altura de 12.7 mm, por medio de una leva rotatoria. La pasta se colocó dentro del molde, el cual debe estar en el centro de la mesa de fluidez, la pasta se compactó 20 veces con el pisón de tal modo que todo el molde quedó cubierto por la pasta. Al transcurrir 1 min a partir del momento de haber terminado el mezclado, el molde se levantó y el platillo se dejó caer, 25 veces en 15 segundos. Posteriormente se tomaron por lo menos 4 mediciones de diámetro de 45° aproximadamente, el cual fue el diámetro de la pasta después de los golpes y así posteriormente determinar el % de fluidez.

7.2.3.2 Elaboración de probetas cúbicas

Se realizaron 324 probetas cúbicas de 15.62 cm³ cada una. La metodología utilizada para la preparación de los cubos obedeció el siguiente procedimiento:

1. Se pesaron los polvos de ligante y de arena.
2. Se preparó la solución activadora, con el fin de dejarla enfriar.
3. Se preparó la arena, mezclándola con la cantidad de agua de absorción de la arena determinada, durante 90 s.

4. Se añadieron los polvos de ligante, CBCA + Fuente de Ca, y la solución a la mezcladora (marca Hobart, modelo A200 capacidad de 5 L), mezclándolos por 30 s a la velocidad baja.
5. Se agregó la cantidad de arena lentamente durante 30 s.
6. Se cambió a la velocidad alta y se mezcló durante 30 s más.
7. Se detiene la mezcladora, dejando reposar por 90 s, y los primeros 15 s de este tiempo, se retira rápidamente de las paredes de la mezcladora y de la olla, con una espátula lo que quedó adherido del mortero.
8. Se mezcló durante 60 s más a la velocidad alta.
9. Se vació la mezcla del mortero en los moldes de Nylamid de 2.5 cm de lado, previamente engrasados, se vibraron por un tiempo de 10 s con el fin de eliminar burbujas de aire presentes.
10. Se cubrieron las probetas con film plástico y paños húmedos para su fraguado por 24 h en la correspondiente cámara isotérmica, después de las cuales se desmoldaron los cubos y se llevaron a sus respectivas condiciones de curado. Se usaron cámaras isotérmicas y contenedores plásticos para el almacenamiento de las muestras hasta los ensayos de RMC (1, 3, 7, 14 y 28 días).

7.2.3.2.1 Ensayo de RMC

La resistencia a la compresión se midió para todos los sistemas de morteros estudiados, con la metodología representada en la **Figura 15**. Para ello se tomaron tres cubos por formulación, para ser ensayados a la edad de 1, 3, 7, 14 y 28 días, esto para tener un valor representativo de RMC.

Los cubos antes de ser sometidos a ensayos, se pesaron en una balanza para posteriormente calcular la densidad y se calculó el área en mm^2 resultante de las dimensiones **a** y **b** perpendiculares a la dirección de colado, estas medidas se obtuvieron con un vernier digital con precisión de 0.01mm, por esta cara se aplicó la carga. Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina marca MTS, modelo QTest Elite /100 kN, la cual tiene acoplado el programa Test Works 4, el cual registra el valor de RMC en MPa y el tiempo de duración del ensayo.

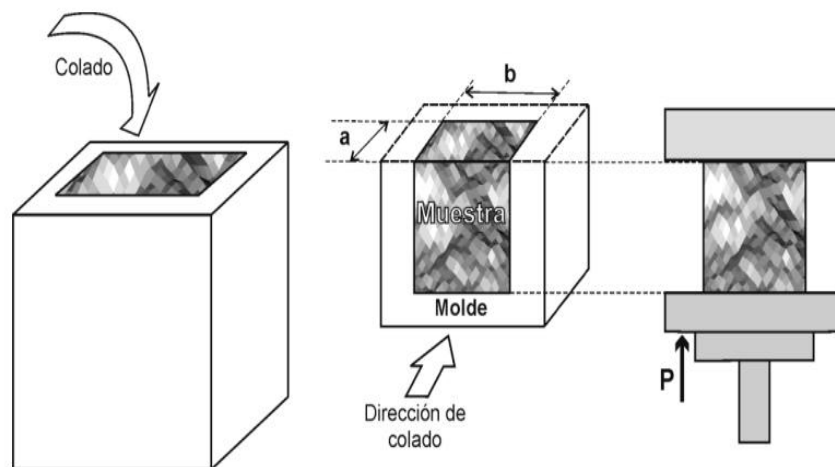


Figura 15. Esquema del ensayo de RMC

7.3 Caracterización de pastas selectas

7.3.1 Difracción por Rayos X

La selección de las pastas a caracterizar se realizó de acuerdo a los valores más altos de RMC obtenidas en los morteros, se tomó una pasta para 1, 3, 7, 14 y 28 días, se fracturaron y se colocaron en recipientes donde se les agregó metanol para detener el avance de la reacción de hidratación, seguido de esto se secaron en una cámara de vacío (marca VWR, modelo 1430-2) a 35°C y 21 in-Hg de presión, posteriormente se tomaron 15 g de muestra y se trituró manualmente en un mortero de porcelana, seguido de esto la muestra se sometió a molienda en un molino planetario (marca RetschPM 400) y finalmente la muestra se hizo pasar por la malla 100, obteniéndose así tamaños de partículas menores a 147 μm . Se utilizó radiación $\text{CuK}\alpha$ (1.542 Å) en las siguientes condiciones de operación para todos los análisis: Rango de barrido de $2\theta=8-60^\circ$, para un paso de $2\theta=0.03^\circ$ y un tiempo de incidencia de 3 s por paso.

El patrón de difracción de la CBCA se obtuvo mediante un Difractómetro Phillips PW3040. Para el estudio de la mineralogía de la CBCA se depositó la muestra en un porta muestras de aluminio. El análisis cualitativo se llevó a cabo mediante el software Phillips X'PertGrafics and Identify, del equipo RX Philips PW3040.

7.3.2 Microscopia Electrónica de Barrido y Espectroscopía por Dispersión de Energía

En esta técnica se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca Phillips modelo XL30ESEM. Mediante esta técnica MEB/EDS se estudiaron de forma simultánea, la morfología de microestructura de diversas muestras y la composición elemental, mediante la detección de los Rayos X emitidos por el espécimen tomado de la cámara isotérmica, los cuales se fracturaron y se colocaron en metanol a edades de 3, 7, 14 y 28 días, posteriormente se secaron en la cámara de vacío (marca VWR, modelo 1430-2).

Las muestras para su previo análisis se montaron en resina epóxica (Epofix). Los especímenes montados en resina se desbastaron sucesivamente con papel metalográfico (Metalinspec) No. 500, 800, 1000 y 1200, posteriormente se pulieron con paño de terciopelo usando pasta de diamante de 3 μ y 1 μ (Struers Labopol-2) y como medio de lubricación para el desbaste y pulido se utilizó metanol.

En el proceso de observación se generan varias señales, tales como:

- **Detector de Electrones secundarios (DES):** Emitidos por el material, provienen de capas situadas en la superficie hasta la profundidad que no excede algunos nanómetros (nm), son utilizados preferentemente para las observaciones morfológicas del mismo.

- **Detector de Electrones Retrodispersados (DER):** Su producción es proporcional y está íntimamente relacionada con el número atómico Z y son empleados para la discriminación de fases existentes dentro del mismo material observado.
- **Electrones Auger:** Son producidos cuando un electrón de una capa interna de un átomo es expulsado por un aporte exterior de energía. Este electrón es emitido con una energía característica del material irradiado y el fenómeno puede servir al microanálisis de la muestra o para reconstruir las imágenes de repartición de los elementos químicos en los primeros nanómetros de la superficie (técnica de microanálisis de capas finas).
- **Detector de Rayos X:** Los electrones que se producen en el filamento wolframio se hacen incidir sobre la superficie de un material, produciéndose una excitación de éste y emisión de radiación. Parte de esta radiación es de tipo Rayos X, con una energía y longitud de onda propias del material, lo que permite deducir y cuantificar los elementos químicos que lo componen.

En la **Figura 16** se presenta un diagrama donde se detallan las señales anteriormente mencionadas.

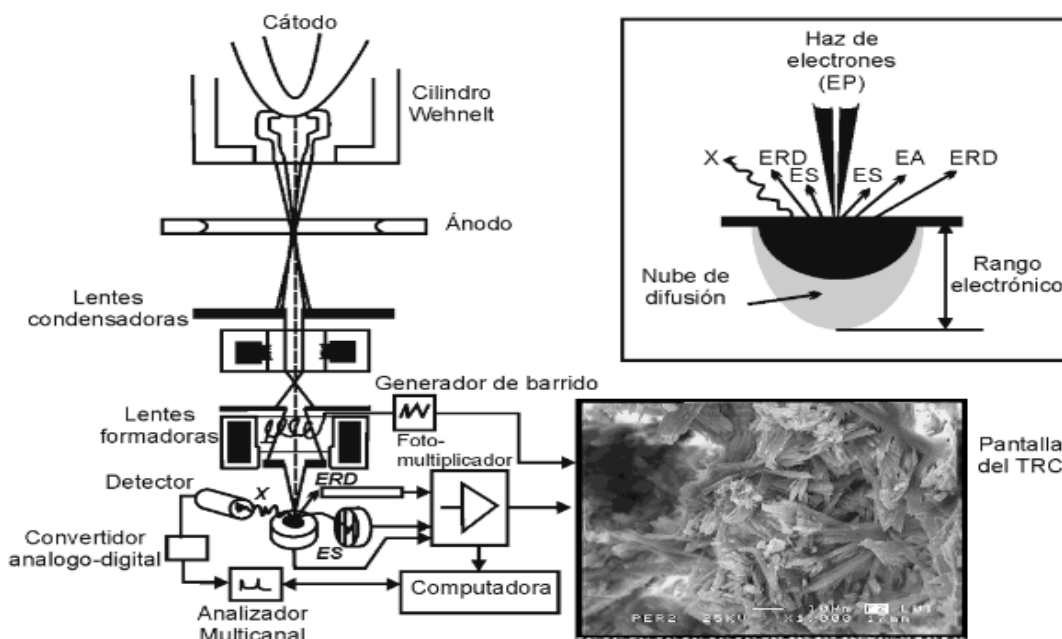


Figura 16. Esquema de un MEB. Recuadro: Interacciones de un haz con un sólido

Fuente: (Magallanes, 2009)

7.3.3 Análisis térmico diferencial y termogravimétrico

Se siguió el mismo procedimiento que se utilizó para la preparación de la muestra en DRX.

En esta técnica se utilizó un analizador térmico diferencial gravimétrico simultáneo (Linseis L 70/2171, modelo Thyristor Power Supply ATD-TG). Las muestras preparadas se colocaron en un crisol de alúmina. Las condiciones a las que se llevó a cabo el análisis fueron a una velocidad de calentamiento de 15°C/min en atmósfera de nitrógeno hasta 1200°C.

7.4 Morteros de CaO/CBCA e Ca(OH)_2 /CBCA sometidos a curado en agua y curado a 100°C

Los morteros después de 28 días de curado a las correspondientes temperaturas, se curaron a 100°C por 24 h, debido a que alcanzaron bajas RMC a 28 días, y con el objetivo de observar cómo evoluciona la RMC al ser curados a 100°C; se realizó un tratamiento térmico a todos los morteros, como la cantidad de cubos por formulación disponible era de 7, se sometieron 4 cubos de cada formulación a curado en agua por 2 horas, con el objetivo de proveer agua a la reacción de geopolimerización, seguido de estas 2 h, se introdujeron a 100°C por 24 h, los 4 morteros curados bajo agua más los 3 morteros que no se curaron en agua.

7.4.1 Ensayo de RMC de morteros curados en agua y curados a 100°C

Se midió cada uno de los cubos con la metodología mencionada en (ver sección 7.2.3.2.1), la medición de la RMC se hizo con el fin de evaluar cómo mejora la resistencia al proveer de agua para la reacción de geopolimerización en ciertos morteros y cómo se desarrolla la resistencia en aquellos que no se curaron en agua.

VIII.PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

8.1 Resultados de ensayo de fluidez

En la **Tabla 19** y **Tabla 20** se muestra el porcentaje de fluidez obtenido para cada una de las pastas, este criterio se utiliza para determinar la cantidad de agua en cada mezcla, ya que al agregarse demasiada cantidad de agua se obtendría una mezcla aguada, y la falta de agua no logra una unión entre los materiales utilizados. Los diferentes porcentajes de CBCA utilizados, muestran que existe una mayor demanda de agua al aumentar el % de CBCA, esto debido a la porosidad de la CBCA y a la distribución de tamaños de partículas de la CBCA, ya que presenta mayor finura con respecto a la fuente de Ca, lo que provoca una diferencia de densidades y ocasiona que exista en la matriz geopolimérica un mayor contenido de partículas de CBCA a lubricar, además la cal viva por su composición presenta una alta retención de agua, la causa de la retención se da por su proceso de obtención, donde se somete la piedra caliza a altas temperaturas (alrededor de 900°C), es decir no existe agua en la cal, por eso al añadirle agua reacciona absorbiéndola (Hernández, 2011).

Tabla 19. Determinación del porcentaje de fluidez para pastas con CaO

%CBCA/ %CaO	% Fluidez	Consistencia
90:10	106.71	Fluida
80:20	104.83	Poco Fluida
70:30	93.59	Seca

Tabla 20. Determinación del porcentaje de fluidez para pastas con Ca(OH)₂

%CBCA/ %Ca(OH) ₂	% Fluidez	Consistencia
90:10	98.87	Fluida
80:20	97.93	Fluida
70:30	88.53	Seca

En la **Figura 17** se observa que el porcentaje de fluidez va en aumento en la medida en que aumenta el porcentaje de sustitución de la fuente de Ca por CBCA,

en el caso de las pastas con Ca(OH)_2 se observa que se requiere de menor cantidad de agua para lubricar las partículas de CBCA e Ca(OH)_2 , ya que en su composición el Ca(OH)_2 tiene un 24.30% de agua, lo que aporta agua a la mezcla y hace que el porcentaje de fluidez de estas pastas sea menor que las pastas que contienen CaO en la matriz geopolimérica. La fuente de Ca y la CBCA tienen propiedades físicas distintas, como el peso volumétrico, porcentaje de humedad, de absorción y de finura, todas estas características influyen en la consistencia normal de la pasta, lo que repercute en la relación Ag/L , encontrándose en el rango de 0.9 a 1.1.

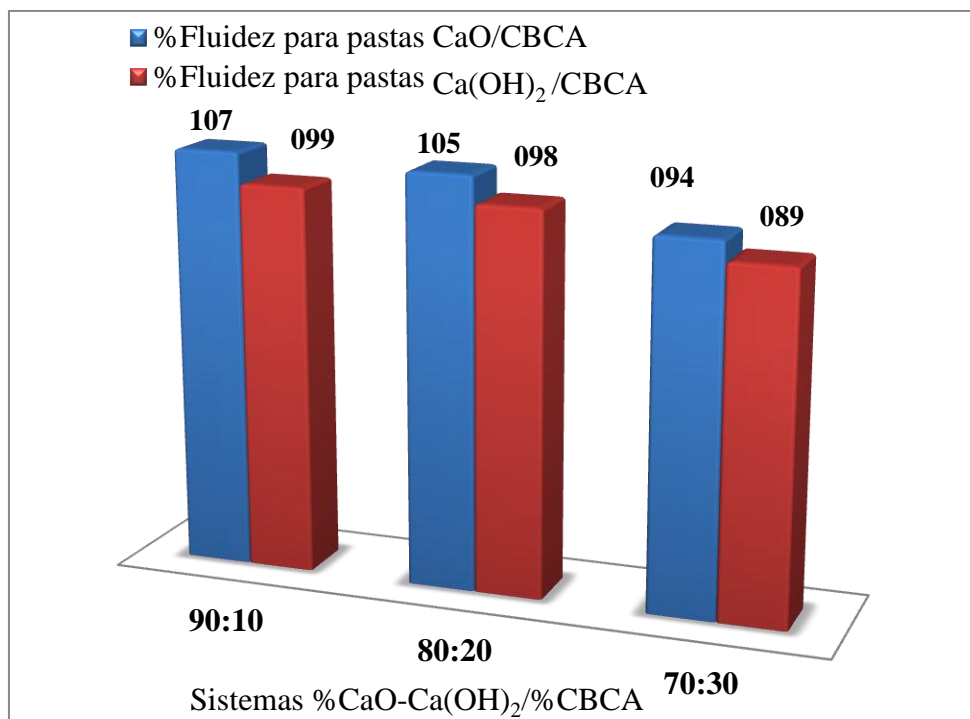


Figura 17. Comportamiento del porcentaje de fluidez en pastas

8.2 Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión en morteros CaO/CBCA

En el **Anexo 17** se muestra los resultados totales de la RMC para morteros de CaO/CBCA organizadas por formulación y fecha estudiada. En la **Figura 18** se observa cómo evoluciona la RMC de los morteros de CaO/CBCA por cada día de curado.

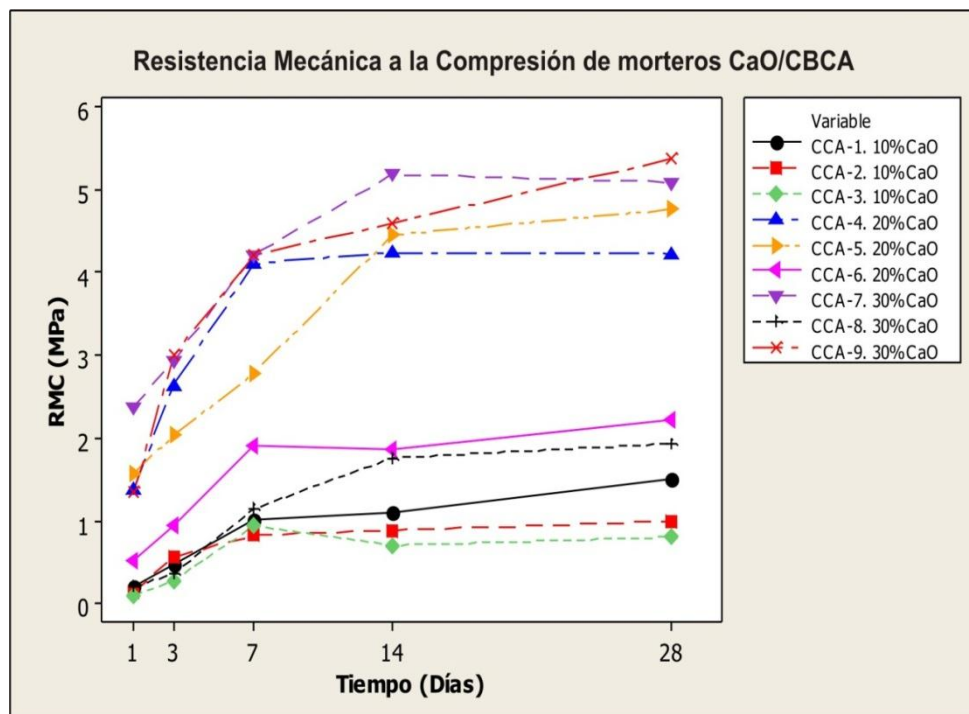


Figura 18. Resultados de evolución de resistencia mecánica a la compresión con el tiempo de morteros CaO/CBCA

Se observa de la **Figura 18**, que a medida que aumenta el % de sustitución de CBCA por CaO aumentan las propiedades mecánicas de los morteros a cualquier edad de ensayo, pero está en dependencia también de los otros dos factores que se tomaron en cuenta, que son la temperatura de curado y el %Na₂O.

Para los sistemas CCA-1, CCA-2 y CCA-3 con un 10% de sustitución de CBCA por CaO, existió un mejor comportamiento para CCA-1, el cual se curó a 20°C y con un porcentaje de Na₂O del 5%, la diferencia de estos 3 sistemas es que, para CCA-3 donde el porcentaje de Na₂O es del 15%, se obtuvieron menores valores de RMC a 28 días, siendo para los 3 sistemas el mayor valor de resistencia de 1.51 MPa, correspondiente a CCA-1. Se puede decir también que para CCA-3 donde la temperatura de curado fue de 20-60-20°C, la temperatura no influyó en el aumento de la resistencia para este sistema.

El porcentaje de sustitución de CBCA por CaO para los sistemas CCA-4, CCA-5 y CCA-6 fue de un 20%, donde se puede observar que para CCA-4 y CCA-5 se reportan los valores mayores de resistencia mecánica, pero cabe destacar que a 1, 14 y 28 días de curado estos sistemas presentaron resistencias similares, siendo de 4.23 MPa para CCA-4 y de 4.77 MPa para CCA-5 a 28 días; pero a 7 días de

curado, la diferencia de resistencia para ambos sistemas fue notoria, siendo de 4.11 MPa para CCA-4 y de 2.78 MPa para CCA-5. El sistema CCA.-6, que tuvo una temperatura de curado de 20°C reporta los menores valores de resistencia, con un porcentaje de Na₂O del 15%.

Para los sistemas CCA-7, CCA-8 y CCA-9 donde el porcentaje de sustitución de CBCA por CaO fue de 30%, se observa que CCA-7 y CCA-8 son los que arrojan mayores valores de resistencia mecánica, con una temperatura de curado de 20-60-20°C y 40°C respectivamente, cabe destacar que a 3, 7 y 28 días las resistencias de estos sistemas son similares, siendo de 5.10 MPa para CCA-7 y de 5.38 MPa para CCA-9 a 28 días de curado.

A simple vista se puede decir que es el aumento en el porcentaje de sustitución de CBCA por CaO, lo que aumenta la resistencia mecánica de los morteros, todos los sistemas tienen en común la relación Ar/L; pero la relación Ag/L difiere para los diferentes niveles de sustitución de CBCA por CaO, los mejores sistemas son los que tienen una relación Ag/L de 0.9, lo que significa que un aumento en la relación Ag/L se traduce en una disminución de las propiedades mecánicas de los morteros; sin embargo los diferentes niveles de temperatura también influyen en la ganancia de resistencia; pero el caso de CCA-1 donde se tiene una temperatura de 20°C, 5%Na₂O y 10%CaO comparado con los otros 2 sistemas, es CCA-1 que tiene los mayores valores de resistencia. Es necesario realizar un análisis más exhaustivo y así conocer cuáles son los niveles óptimos de cada uno de los factores tomados en cuenta, que permita obtener el mayor valor de resistencia mecánica.

8.3 Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión en morteros Ca(OH)₂/CBCA

En la **Figura 19** se observa la evolución de la resistencia mecánica de todos los morteros por cada fecha de ensayo a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de CBCA por Ca(OH)₂, estos valores se reportan en el **Anexo 18**.

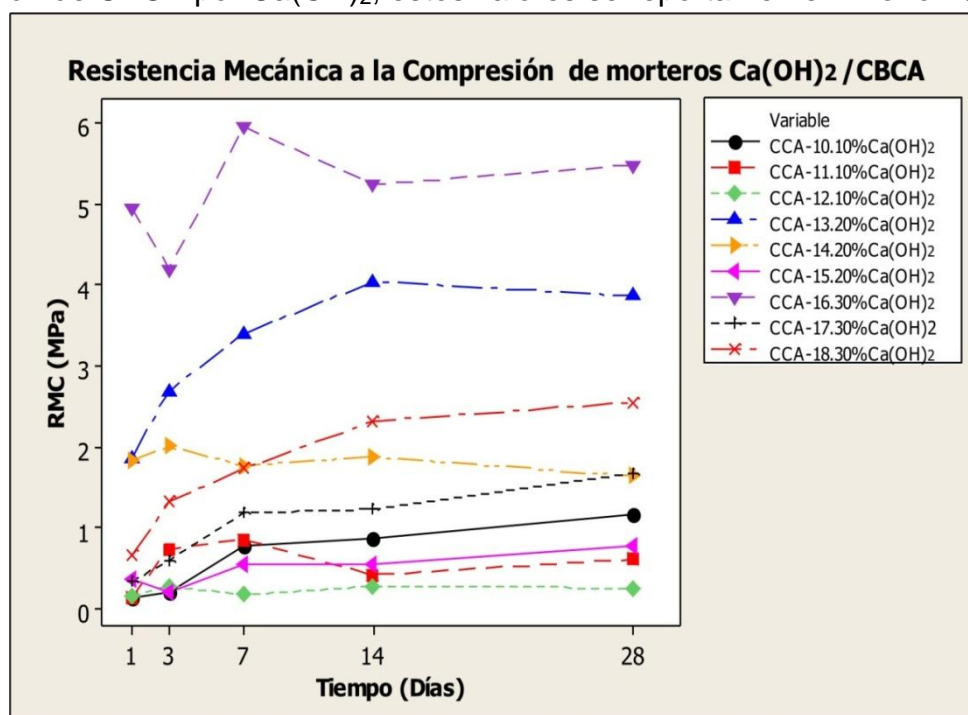


Figura 19. Resultados de evolución de resistencia mecánica a la compresión con el tiempo de morteros $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$

De la

Figura 19 puede observarse que para los sistemas CCA-10, CCA-11 y CCA-12 donde el porcentaje de CBCA sustituida por Ca(OH)_2 corresponde a un 10%, los valores más bajos de resistencia pertenecen a CCA-12, la cual tiene un porcentaje de Na_2O del 15% y una temperatura de curado de 20-60-20°C; sin embargo para CCA-10 y CCA-11, se presentan resistencias similares a 1 día de ensayo, siendo de 0.14 MPa para CCA-10 y de 0.13 MPa para CCA-11, cabe destacar que la resistencia de CCA-11 hasta el día 7 de curado avanzó notoriamente comparada con la resistencia de CCA-10; sin embargo la resistencia de CCA-11 tuvo una disminución a partir del día 14, siendo la del día 28 para CCA-10 de 1.17 MPa y para CCA-11 de 0.61 MPa. Siendo CCA-11 la que mejor respondió en cuanto a avance de resistencia, con una temperatura de curado de 20°C y un porcentaje de Na_2O del 5%.

Para los sistemas CCA-13, CCA-14 y CCA-15, donde el porcentaje de sustitución de CBCA por Ca(OH)_2 fue del 20%, es notable como CCA-13 y CCA-14 desde el día 1 de ensayo exhibieron un aumento de resistencia en comparación a los sistemas donde sólo se sustituyó al 10%, cabe destacar que CCA-13 con un 5% Na_2O y a 40°C fue el sistema con mayor resistencia a 14 días, siendo de 4.04 MPa y de 1.87 MPa para CCA-14. Sin embargo CCA-13 y CCA-14 a los 28 días de curado presentaron una disminución de resistencia a 3.86 y 1.63 MPa, respectivamente.

Puede observarse también que para CCA-16, CCA-17 y CCA-18 donde el porcentaje de sustitución de CBCA fue del 30%, existe un incremento de

resistencia notable para CCA-16, desde el día 1 de ensayo este sistema presentó una resistencia de 4.95 MPa, al día 7 de 5.95 MPa, teniendo una disminución a 5.24 MPa a 14 días y a 28 días fue de 5.48 MPa, este sistema tuvo un porcentaje de Na_2O del 5% y una temperatura de curado de 20-60-20°C. Sin embargo puede observarse también que para CCA-17 y CCA-18 el aumento de la resistencia es constante, es decir no hubo una rampa de disminución y después de aumento. CCA-17 presentó las menores resistencias, teniendo un porcentaje de Na_2O del 10% y temperatura de curado de 20°C.

En estos 9 sistemas la relación Ag/L para los diferentes niveles de sustitución de CBCA por $\text{Ca}(\text{OH})_2$, varía de 1, 0.95 y 0.9, siendo los mejores resultados de resistencia los obtenidos a 0.95 y 0.9, se logra observar que un aumento en esta relación repercute en la disminución de la resistencia. El porcentaje de CaO y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ donde se obtienen menores valores de resistencia es al 10%, y a un 30% se obtienen los mejores valores de resistencia. Sin embargo es necesario comparar los valores a 28 días de cada uno de los 18 sistemas, 9 sistemas con CaO y los restantes con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

A continuación en la

Figura 20 se presenta la comparación de la resistencia entre morteros de CaO/CBCA y morteros $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /CBCA a 28 días de ensayo.

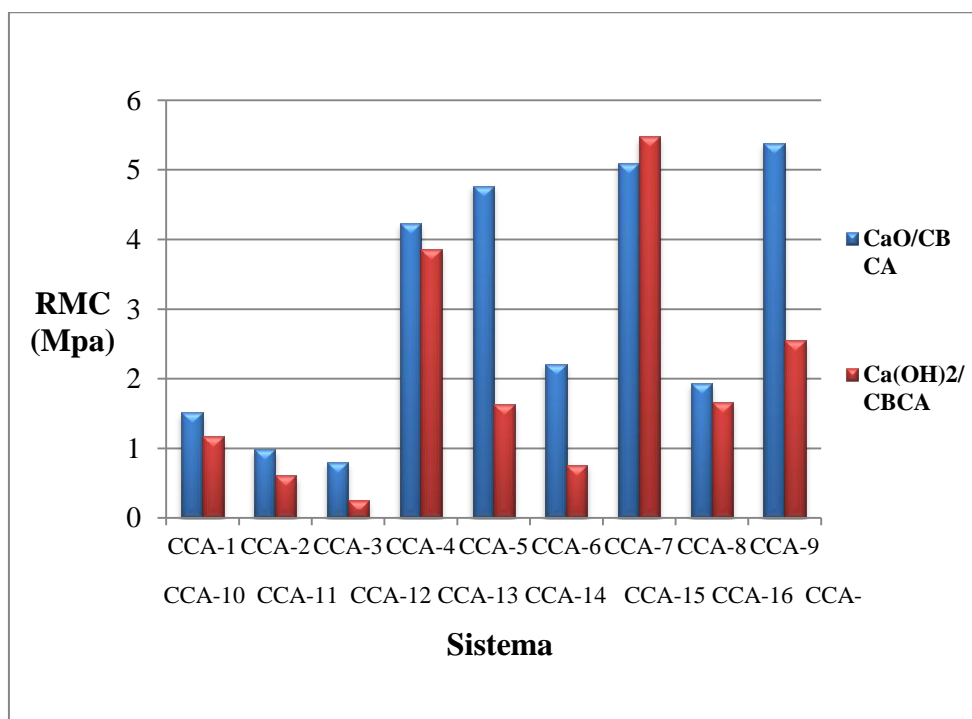


Figura 20. Morteros de CaO/CBCA respecto a morteros $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /CBCA

Se observa de la

Figura 20 que la sustitución de CBCA por CaO a 10, 20 y 30% presenta mejores resistencias mecánicas que los morteros donde se sustituyó la CBCA por Ca(OH)_2 , cabe destacar que los sistemas comparados tienen diferente relación Ag/L y diferente fuente de Ca; pero la temperatura de curado y el porcentaje de Na_2O son los mismos; sin embargo es importante mencionar que a pesar de haber utilizado en el caso de morteros con CaO mayores relaciones Ag/L de 1.1 para los sistemas CCA-1, CCA-2 y CCA-3, y en cambio para los sistemas con Ca(OH)_2 como CCA-10, CCA-11 y CCA-12 donde la relación Ag/L fue de 1, se exhibieron menores valores de resistencia para estos últimos. Lo mismo ocurrió con los 3 siguientes sistemas con distinta fuente de Ca; pero es importante mencionar que para los sistemas CCA-7, CCA-8, CCA-9, CCA-16, CCA-17 y CCA-18 la relación Ag/L utilizada fue de 0.9, y sin embargo se exhibieron mayores resistencias para morteros con CaO. El incremento de resistencia medido en porcentaje comparando cada uno de los sistemas se presenta en la **Tabla 21**.

Tabla 21. Incremento de la resistencia mecánica en morteros CaO/CBCA vs. morteros Ca(OH)_2 /CBCA

Morteros CaO /CBCA	Morteros Ca(OH)_2 /CBCA	Aumento de la RMC (%)
CCA-1	CCA-10	22.63
CCA-2	CCA-11	38.52
CCA-3	CCA-12	69.01
CCA-4	CCA-13	8.76
CCA-5	CCA-14	65.77
CCA-6	CCA-15	65.58
CCA-7	CCA-16	-7.46
CCA-8	CCA-17	13.72
CCA-9	CCA-18	52.65

De la **Tabla 21** puede observarse que existe un porcentaje negativo, esto ocurre debido a que para el sistema CCA-16 a 28 días se presentó una resistencia un poco mayor que CCA-7 a 28 días, siendo para CCA-7 de 5.10 MPa y 5.48 MPa para CCA-16, pero esta diferencia es muy pequeña, por lo que no se puede

aseverar que la sustitución de CBCA por $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en un 30% sea viable, porque es el único sistema que presentó este comportamiento.

En la **Figura 21** se muestra la gráfica de superficie de respuesta de resistencia a 28 días, esta gráfica presenta cómo la respuesta, en este caso la RMC está influenciada por varios factores de carácter cuantitativo; pero sólo se muestran dos factores a la vez. Se puede observar que existen dos puntos óptimos y que para maximizar la resistencia debe utilizarse un 5 y 15% de Na_2O y 30%/70% de CaO /CBCA.

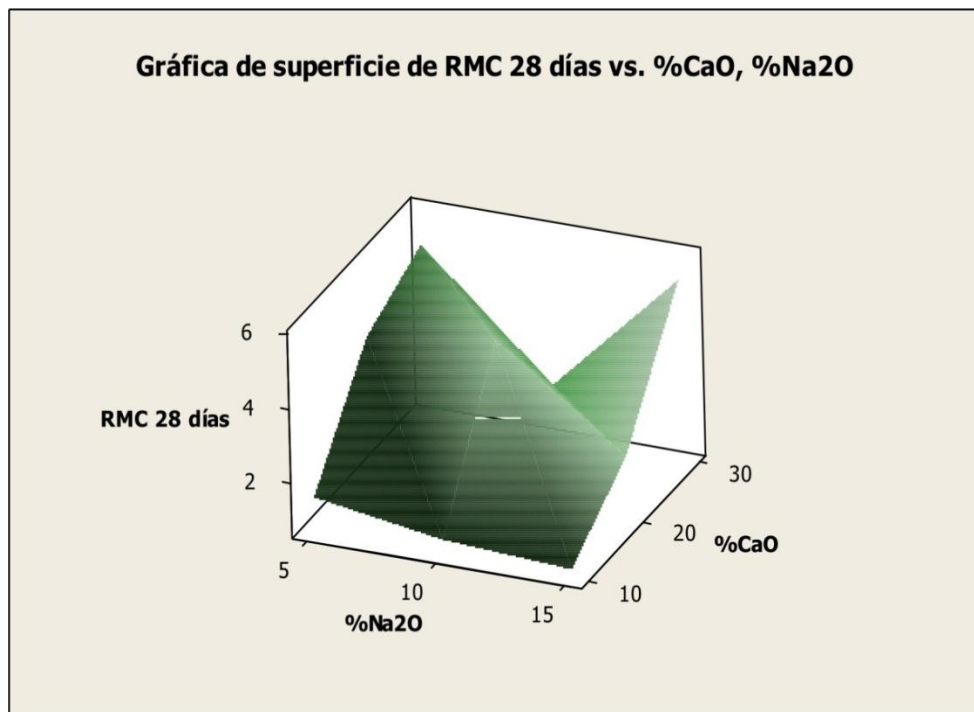


Figura 21. Gráfica de superficie de respuesta para RMC a 28 días de morteros CaO/CBCA

En la **Figura 22** se presenta la gráfica de contorno de resistencia a 28 días, esta gráfica resulta útil para estudiar los niveles de los factores en los que se da un cambio en la forma o altura de la superficie de respuesta. Esta gráfica indica que para maximizar la resistencia mecánica a la compresión se debe de utilizar un porcentaje de CaO del 30% y un porcentaje de Na_2O del 15%.

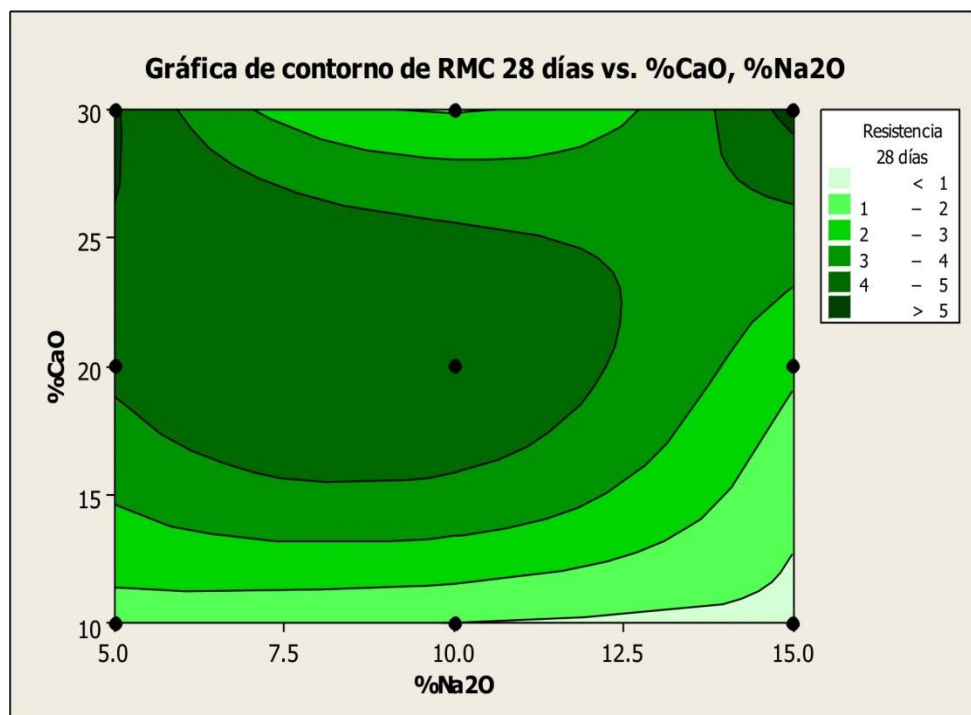


Figura 22. Gráfica de contorno de RMC a 28 días de morteros de CaO/CBCA frente a los factores %Na₂O vs. %CaO

El análisis del método Taguchi se realizó en el programa estadístico Minitab 15, con el propósito de conocer las condiciones óptimas de cada factor. El análisis estadístico se realizó con la característica de calidad *más alto es mejor*, es decir maximizar el valor de la resistencia mecánica. El método consiste en calcular la señal ruido (S/N), la cual permite establecer las condiciones óptimas. En la **Figura 23** la condición óptima de cada factor, dado que se quiere maximizar el desarrollo de la resistencia, es la del nivel con la S/N mayor.

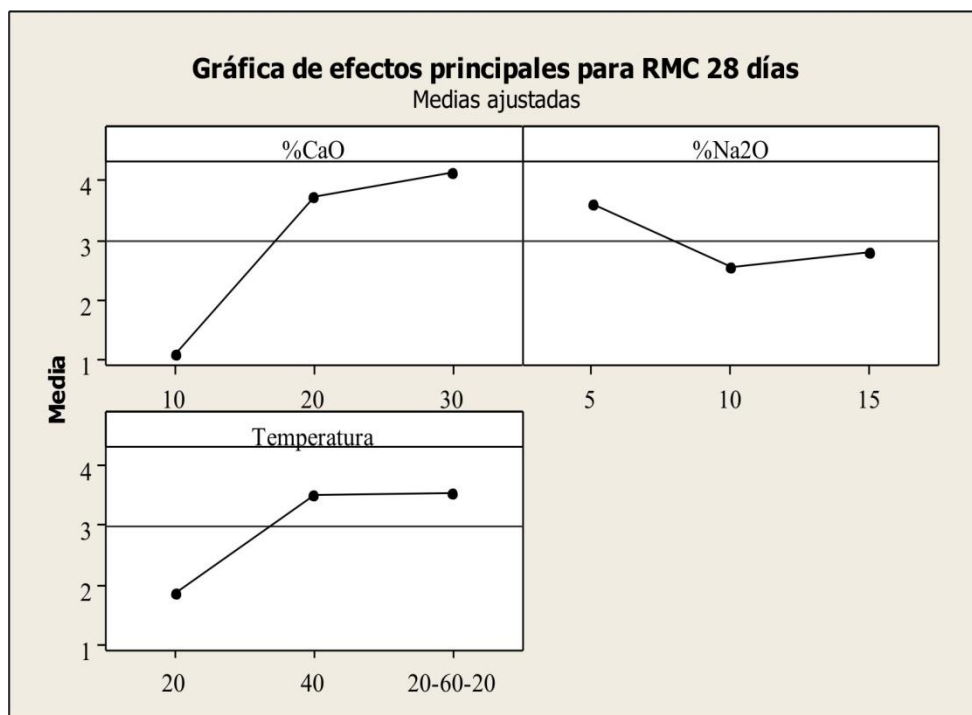


Figura 23. Efectos principales para relaciones S/N para resistencia de morteros CaO/ CBCA a 28 días

Se observa de la **Figura 23** que, para maximizar el valor de la RMC, es necesario utilizar el nivel más alto de sustitución de CBCA por CaO de un 30%, además una temperatura de curado de 40°C y el porcentaje de activante más bajo de Na₂O de un 5%.

En la **Tabla 22** se presentan los niveles óptimos de los factores en estudio para una formulación que permita aumentar el valor de la resistencia mecánica de los morteros de CaO/CBCA.

Tabla 22. Niveles óptimos de los factores en estudio para morteros CaO/CBCA

Factor	Nivel
CaO/CBCA (%)	30/70
Na ₂ O(%)	5
Temperatura de curado(°C)	40

En el caso de los morteros con Ca(OH)₂ es necesario realizar el mismo análisis, en este caso se presenta la **Figura 24**, correspondiente a la gráfica de superficie de respuesta para la resistencia mecánica a 28 días de morteros de Ca(OH)₂/CBCA vs. %Ca(OH)₂ y %Na₂O. El nivel óptimo para maximizar la resistencia se obtiene con un porcentaje de Ca(OH)₂ de 30% y el nivel más bajo de Na₂O correspondiente a un 5%.

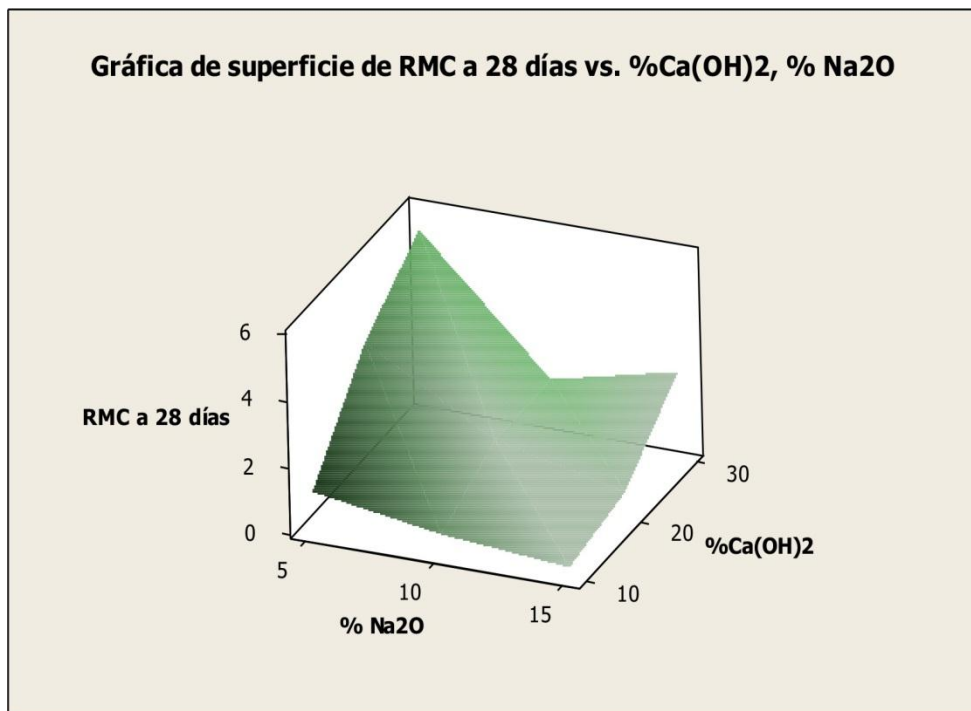


Figura 24. Gráfica de superficie de respuesta para RMC a 28 días de morteros Ca(OH)₂/CBCA

Es necesario realizar la gráfica de contorno (**Figura 25**) para la superficie de respuesta, donde se muestra que, para lograr un máximo valor de RMC el porcentaje de sustitución de Ca(OH)₂ por CBCA debe estar alrededor de un 30% y de igual forma el porcentaje de Na₂O deber ser del 5%.

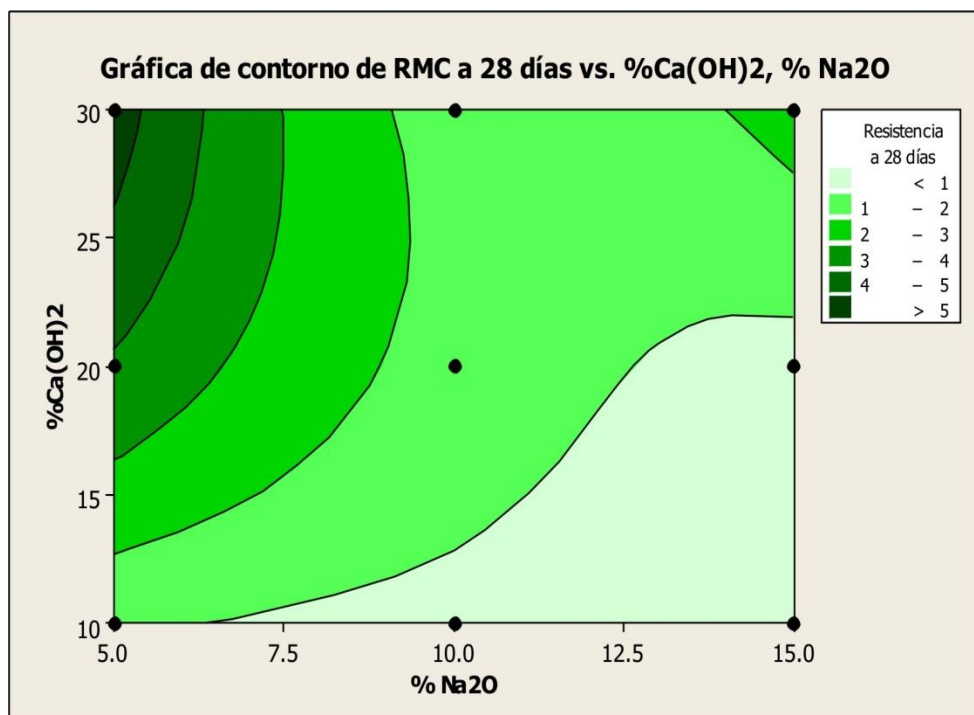


Figura 25. Gráfica de contorno de RMC a 28 días de morteros de Ca(OH)₂/CBCA frente a los factores %Na₂O vs. %Ca(OH)₂

De manera similar se realizó el análisis estadístico utilizando la herramienta del programa Minitab 15, para obtener la S/N de los factores en estudio. En la **Figura 26** se observa que, para maximizar el valor de RMC para los morteros de Ca(OH)₂/CBCA es necesario utilizar un porcentaje de Ca(OH)₂ de 30%, porcentaje de activante de Na₂O de 5% y una temperatura de curado de 40°C.

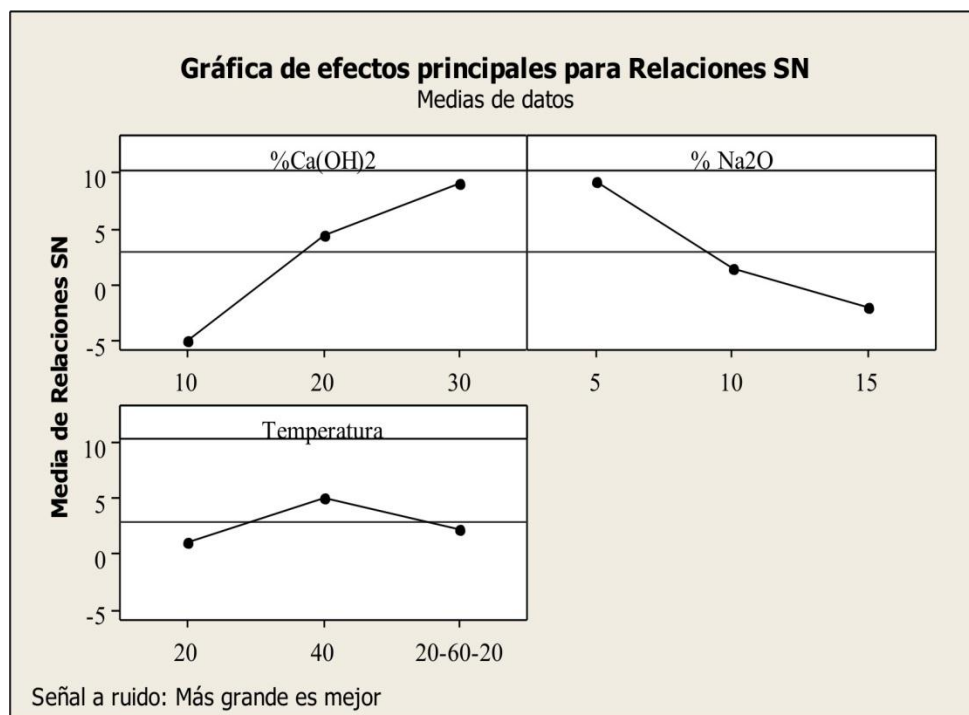


Figura 26. Efectos principales para relaciones S/N para resistencia de morteros $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CBCA}$ a 28 días

En la **Tabla 23** se presentan los niveles óptimos de los factores estudiados, que permita obtener mejores resultados de RMC de los morteros de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CBCA}$

Tabla 23. Niveles óptimos de los factores en estudio para morteros $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CBCA}$

Factor	Nivel
$\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CBCA}$ (%)	30/70
Na_2O (%)	5
Temperatura de curado($^{\circ}\text{C}$)	40

8.4 Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión de morteros curados en agua y a 100°C

La cantidad de morteros disponibles después del día 28 para las 18 formulaciones fue solamente de 7 cubos por cada formulación. Al observar que los resultados de RMC no evolucionaron, al día 28 se decidió curar 4 morteros por 2 horas en agua, con el fin de proveer de agua a la reacción de geopolimerización, seguido de un curado a temperatura elevada de 100°C por 24 h, los 3 morteros restantes solamente se curaron a 100°C por 24 h.

En el **Anexo 19** se encuentran los datos de resistencia mecánica obtenidos para los morteros de CaO/CBCA , ordenados por sistema, se presentan los valores de RMC a la izquierda en MPa y los valores de DE a la derecha obtenido con un

promedio de 3 especímenes. Estos datos se observan en la **Figura 27**, donde se comparan los valores de RMC obtenidos para cada una de los sistemas.

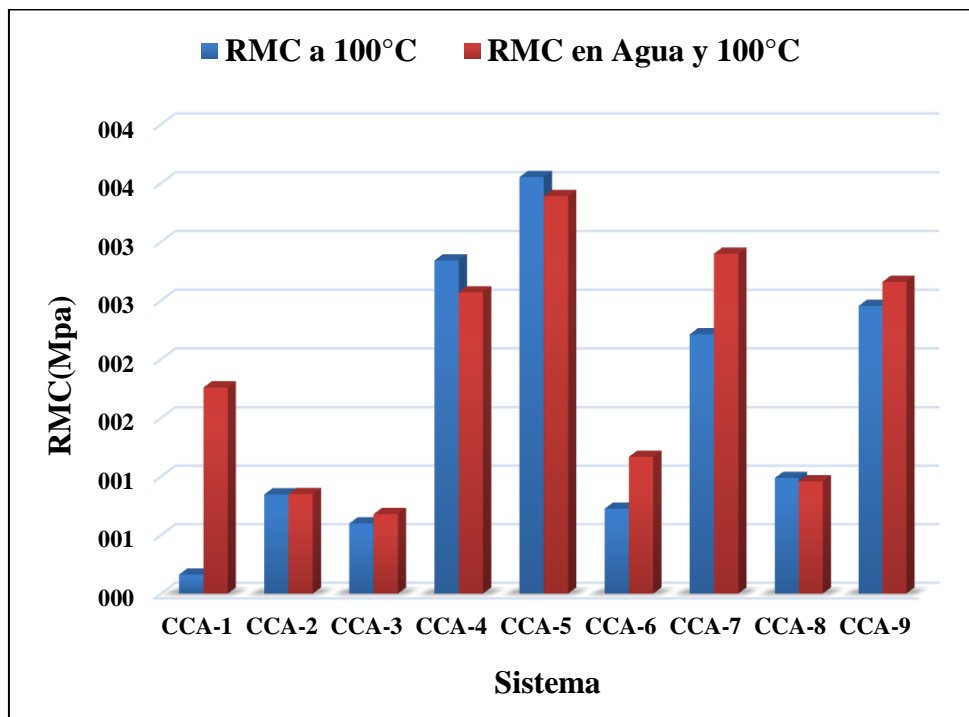


Figura 27. Morteros de CaO/CBCA curados a 100°C y curados en agua y 100°C

De la **Figura 27** se puede observar que para la mayoría de sistemas los valores de RMC son mayores para los morteros que se curaron en agua seguido de un curado a 100°C; pero si se evalúa de acuerdo a los porcentajes de sustitución de CaO por CBCA, comenzando con el 10% se logra observar que el sistema que presenta mayor RMC de CCA-1, CCA-2 y CCA-3 es el primero de estos tres, el cual tiene un porcentaje de sustitución de Na_2O del 5%, siendo de 1.76 MPa, y si se compara con el valor obtenido a 28 días y a 20°C que fue de 1.51 MPa, logra observarse que hubo una pequeña evolución de la RMC, sin embargo un curado a 100°C arrojó un valor de RMC de 0.16 MPa, por lo que se puede decir que para este sistema al proveer de agua a la reacción de geopolimerización significó una ganancia de resistencia mecánica. Sin embargo para los sistemas CCA-2 y CCA-3 la resistencia no evoluciona, al contrario disminuye de 0.99 MPa a 28 días a 0.85 MPa a 100°C, y de 0.80 MPa a 28 días a 0.60 MPa a 100°C, respectivamente.

Para los sistemas CCA-4, CCA-5 y CCA-6 con un 20%CaO, se observa que la resistencia mecánica aumentó al no proveer de agua a la reacción; pero es necesario mencionar que los valores de resistencia son similares para CCA-4, de 2.84 y 2.57 MPa curado sólo a 100°C y curado en agua y a 100°C respectivamente, para CCA-5 se tienen valores similares de resistencia, siendo de 3.55 MPa curado a 100°C y de 3.39 MPa curado en agua y a 100°C. En cambio para CCA-6 si hubo

un aumento de resistencia, siendo de 0.73 MPa curado a 100°C y de 1.17 MPa curado en agua y a 100°C.

Se puede observar también que para los sistemas CCA-7 y CCA-9, la resistencia mecánica aumentó para los morteros curados en agua y a 100°C, cabe destacar que las resistencias obtenidas son similares, siendo para CCA-7 de 2.21 MPa curado a 100°C y de 2.90 MPa curado en agua y a 100°C, para CCA-9, los valores de resistencia son de 2.45 MPa curado a 100°C y de 2.66 MPa curado en agua y a 100°C. De manera similar ocurre con CCA-8, siendo la resistencia de 0.99 MPa curado a 100°C y de 0.96 MPa curado en agua y a 100°C.

Es importante mencionar que para los 9 sistemas sometidos a 100°C y curados en agua, ninguno presentó evolución de resistencia mecánica después de 28 días, al contrario hubo disminución de la resistencia. El aumento de la temperatura de curado, indujo la aceleración de las reacciones químicas; pero no así en un aumento de la resistencia mecánica,

En el

Anexo 20 se encuentran los resultados de RCM obtenidos para los 9 sistemas de morteros de $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ sometidos a 100°C, y en agua y 100°C, estos valores están representados en la **Figura 28**.

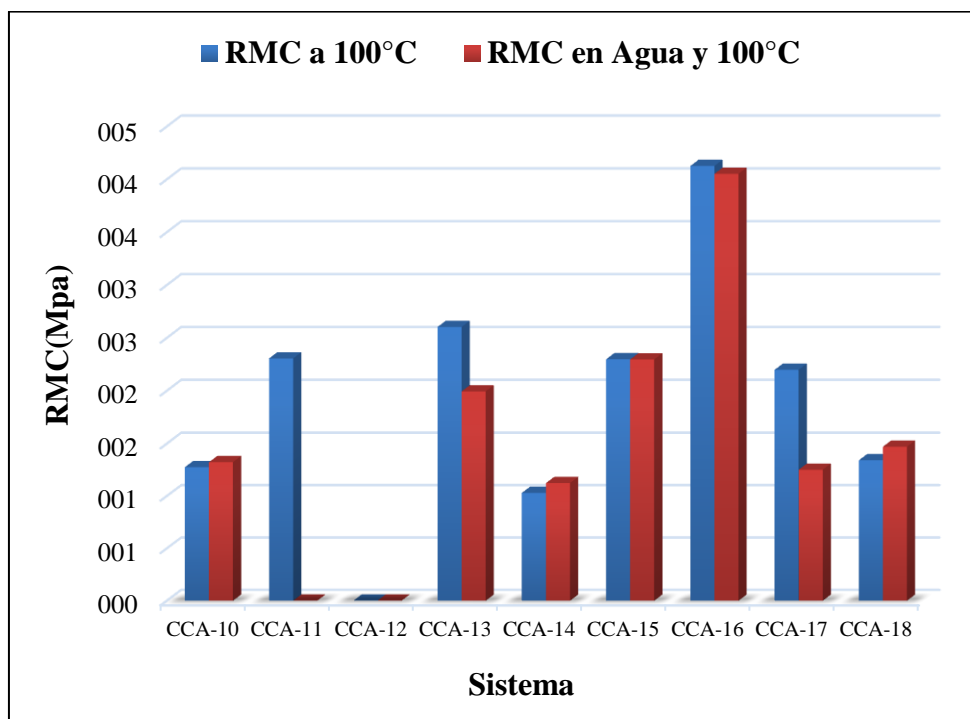


Figura 28. Morteros de $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ curados a 100°C y curados en agua y a 100°C

De la **Figura 28** se observa que los morteros que presentaron mayor resistencia mecánica en su mayoría son los curados a 100°C, de los sistemas CCA-10, CCA-11 y CCA-12 el que presentó mayor RMC de estos tres fue CCA-11, con un porcentaje de Na_2O del 10%, y si se compara con los datos de resistencia obtenida con un curado a 40°C, para este sistema logra observarse que la RMC aumentó de la que se tenía a 28 días (1.17 MPa) a 2.31 MPa. No obstante los morteros al ser curados en agua no soportaron estas condiciones y se deshicieron, por lo tanto no fue posible seguir el estudio de las formulaciones CCA-11 y CCA-12 para su posterior tratamiento térmico a 100°C.

Para los siguientes sistemas CCA-13, CCA-14 y CCA-15 con una sustitución del 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$, logra observarse que para CCA-13 se tiene el mayor valor de RMC a 100°C de 2.60 MPa; sin embargo para CCA-14, el mayor valor de RMC fue para el sistema curado en agua y a 100°C; siendo de 1.12 MPa; sin embargo para CCA-15 la RMC se mantiene en el mismo valor para ambos tratamientos, siendo de 2.30 MPa.

Para los sistemas con un 30% $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que corresponden a CCA-16, CCA-17 y CCA-18, las resistencias de los dos primeros sistemas fueron mayores para el tratamiento sólo a 100°C, y para CCA-18 las RMC fueron similares, siendo de 1.34 MPa a 100°C y de 1.47 MPa curado en agua y 100°C.

La resistencia mecánica de los sistemas CCA-10, CCA-11, CCA-15 y CCA-17 aumentó con el tratamiento a 100°C de la que se tenía a 28 días. Sin embargo los sistemas CCA-12, CCA-13, CCA-14, CCA-16 y CCA-18 presentaron una disminución de la RMC, debido a la cantidad de agua utilizada para el mezclado de los polvos, ya que la relación Ag/L agregada a estas formulaciones fue mayor comparado con los 9 sistemas que contenían CaO en la matriz.

En el curado a temperatura elevada se provocaron grietas en la superficie del mortero, lo que resulta en una pérdida de fuerza, una disminución de la vida útil u otro problema de durabilidad. El curado a temperatura elevada es eficaz, pero de 30°C a 90°C, ya que se tiene una contribución significativa en las reacciones geopoliméricas en este rango de temperatura, que logra observarse con los datos de resistencia mecánica de los morteros curados en ese rango de temperatura.

La resistencia mecánica disminuyó con un curado a una temperatura elevada para período de tiempo más largo de curado prolongado a temperatura de 100°C, ya que se rompe la estructura granular de la mezcla de geopolímeros, lo que provocó una deshidratación o evaporación de agua y encogimiento excesivo debido a la contracción y desintegración del gel geopolimérico.

8.5 Resultados de Microscopia Electrónica de Barrido

En este acápite se muestran los resultados de las microestructuras de muestras selectas a 3 y 28 días de curado, analizadas a 250, 500, 1000 y 1500 aumentos obtenidas mediante electrones retrodispersados, en principio, esta técnica se encuentra orientada a detectar la densidad atómica, la cual puede ser relacionada con el número atómico y la densidad de los granos que forman el espécimen, y a su vez la brillantez de los electrones del espécimen es directamente proporcional al número atómico promedio de la zona irradiada, con esto es posible explotar el contraste químico y se pueden distinguir las fases presentes en la muestra, acorde a los tonos, siendo las zonas más brillantes zonas anhidras sin reaccionar, las zonas grises son productos de reacción y las zonas oscuras corresponden a poros, ya que existe vacío y el número atómico es cero.

Para este estudio, los resultados se dividieron en dos secciones:

- ✓ Análisis microestructural
- ✓ Determinación de la composición química de los productos de reacción mediante el análisis puntual por EDS.

Se emplearon rótulos para identificar las zonas en las microestructuras, las cuales fueron referidas de la siguiente manera:

AR → Anillos de reacción

PR → Productos de reacción

Se seleccionaron muestras de alta RMC a 3 y 28 días. Las formulaciones seleccionadas se listan en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Formulaciones seleccionadas para su caracterización por MEB y EDS

%CaO-%CBCA	%Ca(OH) ₂ -CBCA	Formulación	RMC(MPa)	
			3 días	28 días
	30%CaO-70%CBCA	CCA-7	2.94	5.10
	30%Ca(OH) ₂ -70%CBCA	CCA-16	4.20	5.48

8.5.1 Análisis microestructural

Sistema CCA-7

El sistema CCA-7 que alcanzó una RMC=2.94 MPa a 3 días, fue activado con 5%Na₂O y curado a 20-60-20°C. La microestructura formada se muestra en la **Figura 29**. Se observó una matriz de productos de reacción poco densa, de tonalidad gris oscuro, con alta presencia de poros. Se encontraron partículas de CBCA de morfología irregular sin reaccionar al día 3 de curado, lo que indica que el ataque químico de los activadores a la sílice de la CBCA al tercer día no se ha completado. Sin embargo, también se encontraron partículas de CBCA parcialmente reaccionadas, con presencia de anillos de reacción. Así mismo al día 3 de curado se encontraron partículas de Ca(OH)₂ parcialmente reaccionadas, lo que indica que no todo el Ca(OH)₂ participó en su totalidad en la reacción con la CBCA.

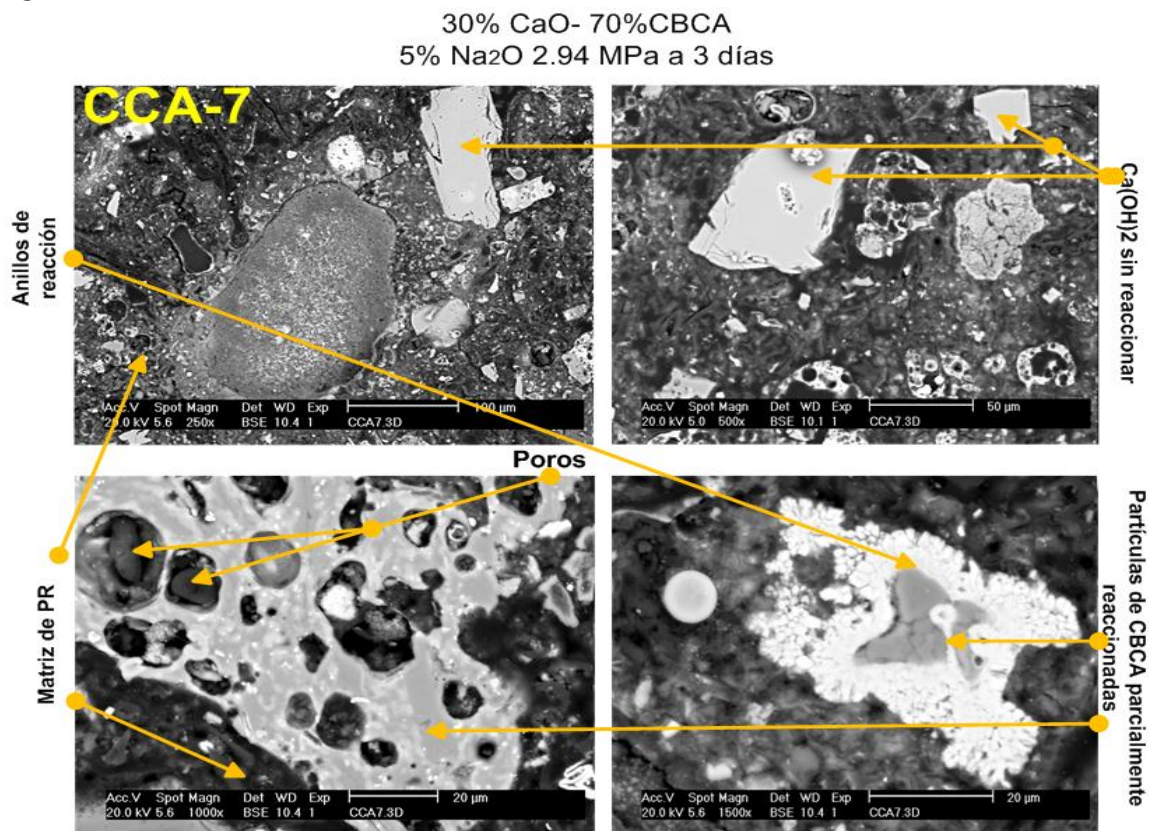


Figura 29. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-7 a 3 días

De acuerdo con los espectros obtenidos por EDS (

Figura 30), para las microestructuras de la muestra CCA-7 a 3 días, la matriz de productos de reacción está conformada por un gel amorfo compuesto en su

mayoría por *Si*, *Ca* y *Al*, con un mayor contenido de *Si* que la CBCA sin reaccionar. La condensación del gel de sílice en la matriz se pudo comprobar con los análisis por EDS, por lo que puede decirse que el mecanismo de reacción de las partículas de CBCA fue vía disolución-condensación (Ortega, 2014). Los productos de reacción formados alrededor de las partículas de CBCA, también presentaron altas concentraciones de *Si*, *Ca* y *Al*, por lo que puede asumirse, que el gel geopolimérico *C-A-S-H* se ha formado, al igual que el gel de sílice *C-S-H*, ya que este se encontró presente en los análisis de DRX en polvos.

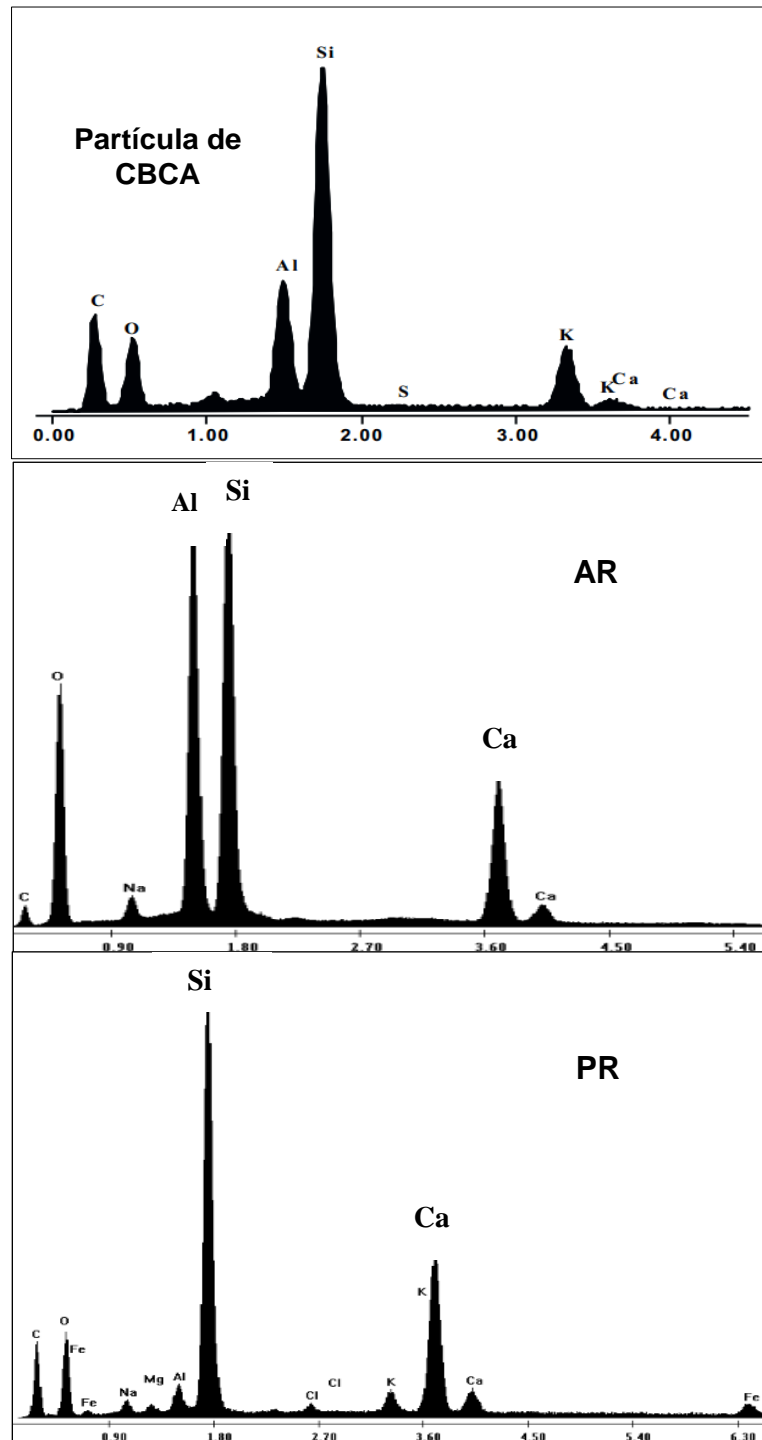


Figura 30. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-7 a 3 días

En la **Figura 31** se muestran las micrografías obtenidas para el sistema CCA-7, que alcanzó una RMC=5.10 MPa a 28 días, puede observarse que la matriz formada posee una tonalidad gris, con mucha presencia de grietas, las cuales se pudieron formar debido al secado y vacío dentro de la columna del MEB, se encontraron en la microestructura partículas de CBCA sin reaccionar, lo que infiere que al día 28 la reacción aún no se ha completado; sin embargo es importante mencionar que los análisis por EDS realizados a la matriz de PR, indican que contiene una gran cantidad de Si, Ca y Al, lo que indica posiblemente la presencia del geopolimérico *C-A-S-H* y gel de sílice *C-S-H*. En la microestructura se observaron también AR, cuya tonalidad es de gris claro. Existió también la presencia de poros, cuya morfología aparentemente es circular, los cuales probablemente se hayan formado producto del desprendimiento de partículas de CBCA durante la preparación y pulido de la muestra.

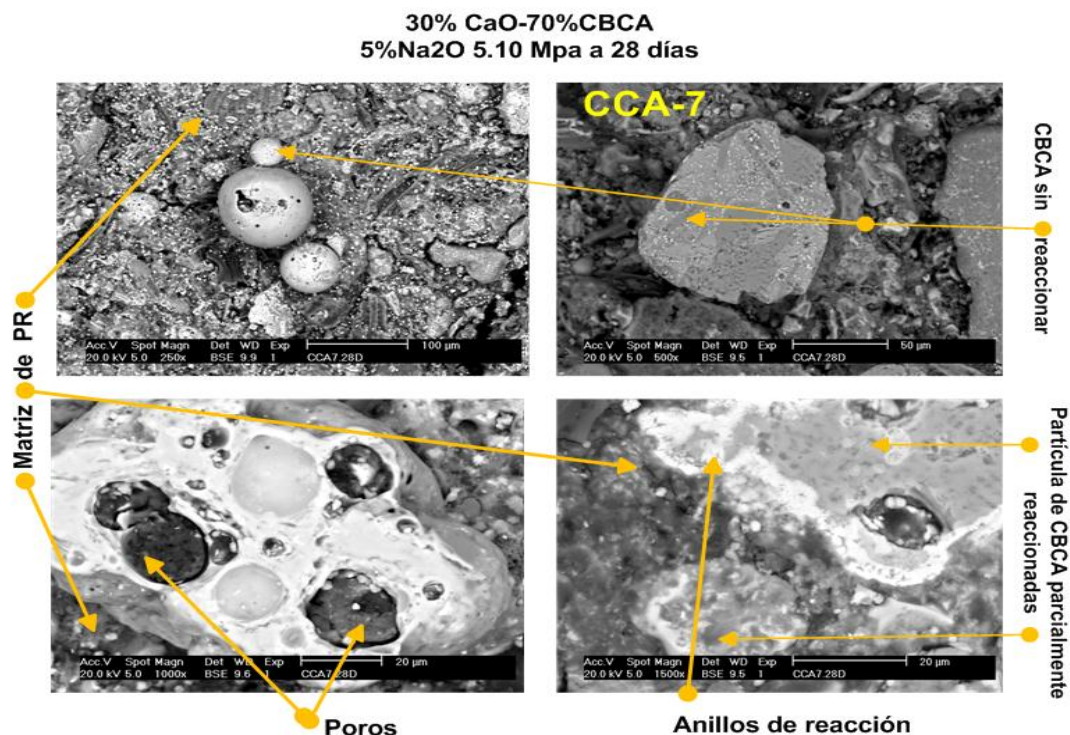


Figura 31. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-7 a 28 días

Los análisis por EDS (**Figura 32**) indicaron que estas cavidades (poros) contienen CBCA sin reaccionar. No se encontraron partículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sin reaccionar, probablemente se haya agotado al día 28, lo que infiere que la RMC después de esta fecha ya no alcanza mayores valores, ya que se quedó la sílice de la CBCA sin el ataque químico que provoca el Ca en su estructura.

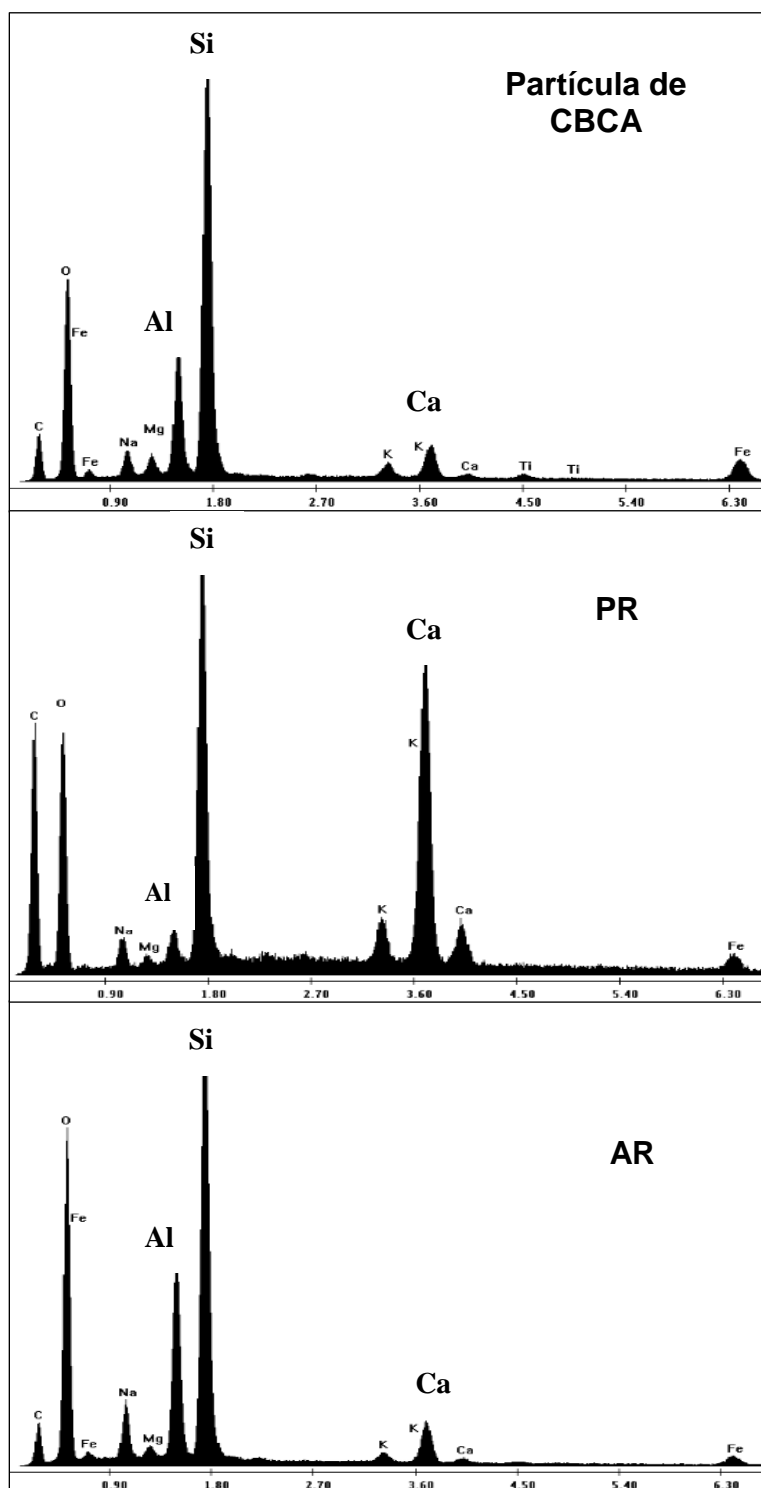


Figura 32. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-7 a 28 días

Sistema CCA-16

La **Figura 33** presenta la microestructura de la pasta CCA-16 que fue activada con 5%Na₂O y desarrolló una RMC=4.2 MPa a 3 días de curado. En la microestructura pueden distinguirse tres fases de diferentes tonalidades, rotuladas como CBCA sin reaccionar, que pueden distinguirse por su morfología en forma de esferas y bastones y de aspecto brillante. La segunda fase identificada corresponde a partículas de Ca(OH)₂ parcialmente reaccionadas, que son partículas de morfología irregular, con cierta presencia de AR. Finalmente se logró observar los productos de reacción PR, que formaron una matriz poco homogénea de tonalidad gris oscura diferente a las partículas de CBCA e Ca(OH)₂. La matriz fue poco densa, con alta presencia de poros, homogéneamente dispersos en la matriz. Estos poros pudieron haberse formado debido al desprendimiento de las partículas de CBCA, durante la preparación y pulido de la muestra, debido a la baja RMC.

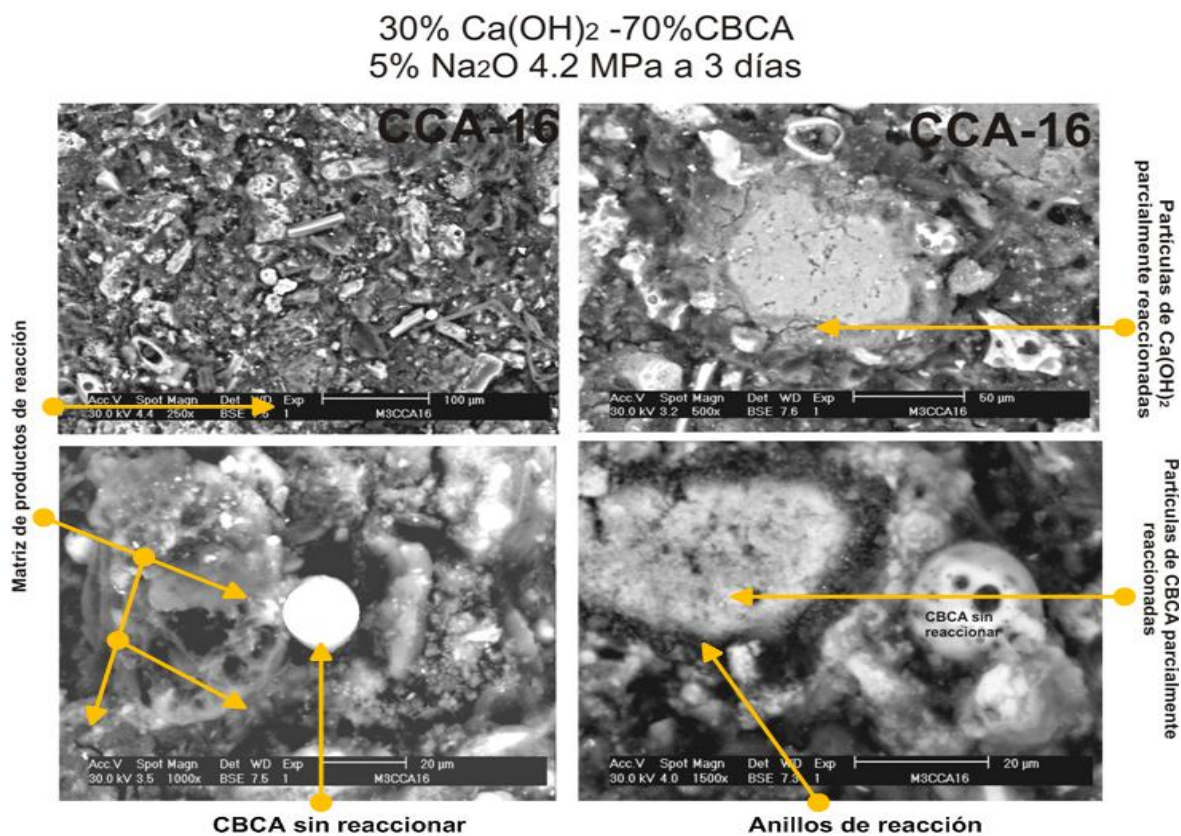


Figura 33. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-16 a 3 días

Los análisis por EDS (**Figura 34**) mostraron una matriz de PR ricos en Si, Ca y Al, correspondiente al gel de sílice *C-S-H*, además de zonas ricas en Si, Al y Ca, lo que indica que probablemente corresponda al gel geopolimérico *C-A-S-H*.

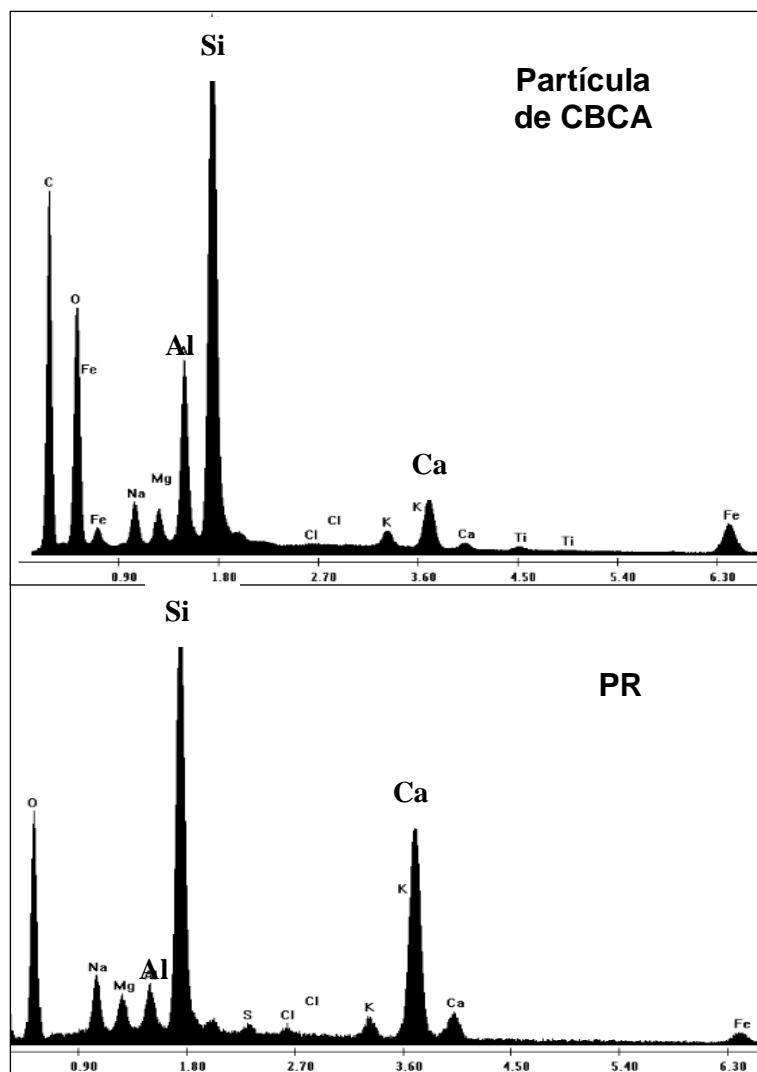


Figura 34. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-16 a 3 días

Las microestructuras observadas para el sistema CCA-16 a 28 días de curado con una RMC=5.48 MPa, se muestran en la **Figura 35**. Puede notarse la presencia de cuatro fases distintas, i) CBCA sin reaccionar, la que puede distinguirse por su tonalidad gris y superficie lisa, ii) CBCA parcialmente reaccionada, con una tonalidad gris claro, que según su morfología irregular, infiere que está siendo atacada por el activador químico, iii) Productos de reacción, inmersos en una matriz de tonalidad gris oscura, con poca presencia de poros, que según los análisis puntuales por EDS (**Figura 36**) indican una composición química rica en *Si*, *Ca* y *Al*, y iv) Anillos de reacción, cuyos espectros obtenidos por EDS indican también una composición rica en *Si*, *Al* y *Ca*; sin embargo es importante destacar que pudieron haberse formado dos principales productos de reacción, que se encuentran íntimamente mezclados, siendo los principales, el gel de sílice *C-S-H* y el gel geopolimérico *C-A-S-H*; pero para tener la certeza de ello se debe recurrir a técnicas como la Resonancia Magnética Nuclear para su identificación.

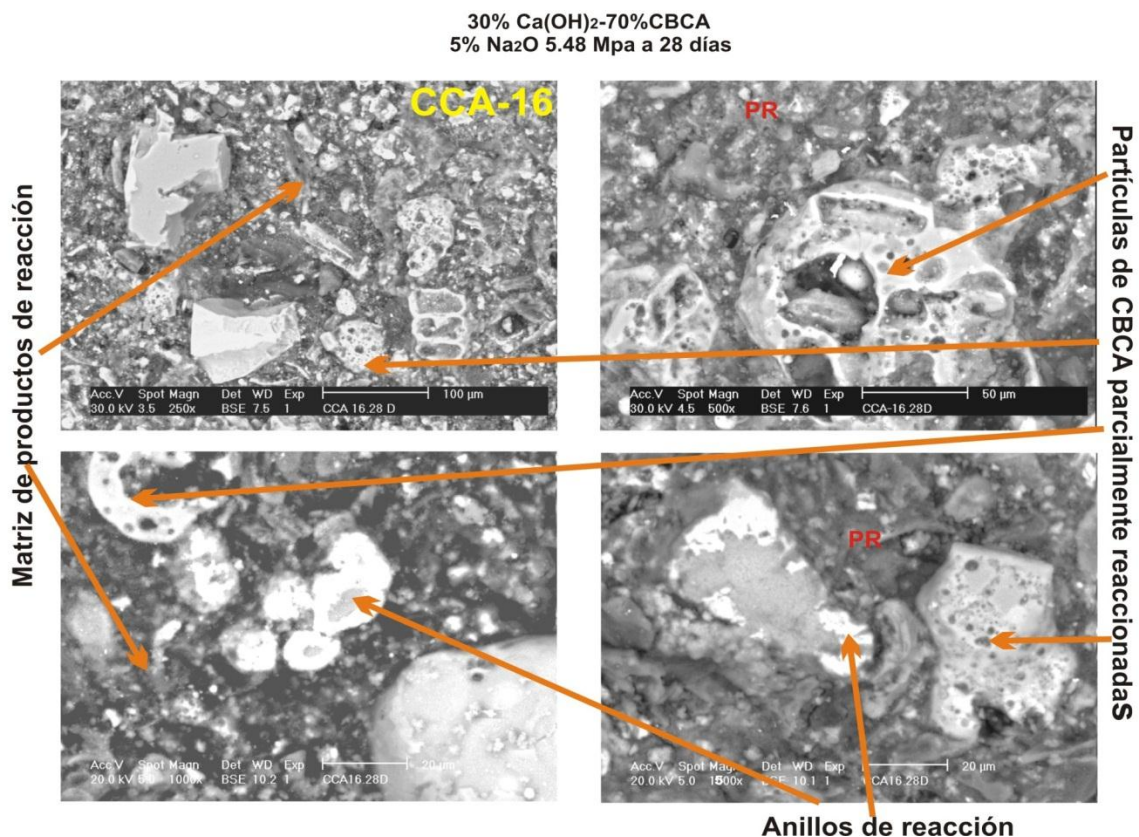


Figura 35. Microestructuras de pastas obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados del sistema CCA-16 a 28 días

Al realizar comparaciones de las microestructuras del mismo sistema CCA-16 a 3 y 28 días de curado, se observó a 3 días partículas de CBCA sin reaccionar, y partículas brillantes de Ca(OH)_2 , se observó también partículas de CBCA parcialmente reaccionadas, porque logran observarse los anillos de reacción. En cambio para la muestra de CCA-16 a 28 días de curado, logra observarse la formación de una matriz más densa y compacta, con menor contenido de partículas de CBCA sin reaccionar, y la correspondiente formación de AR, indicando el ataque químico de los activadores a la sílice de la CBCA.

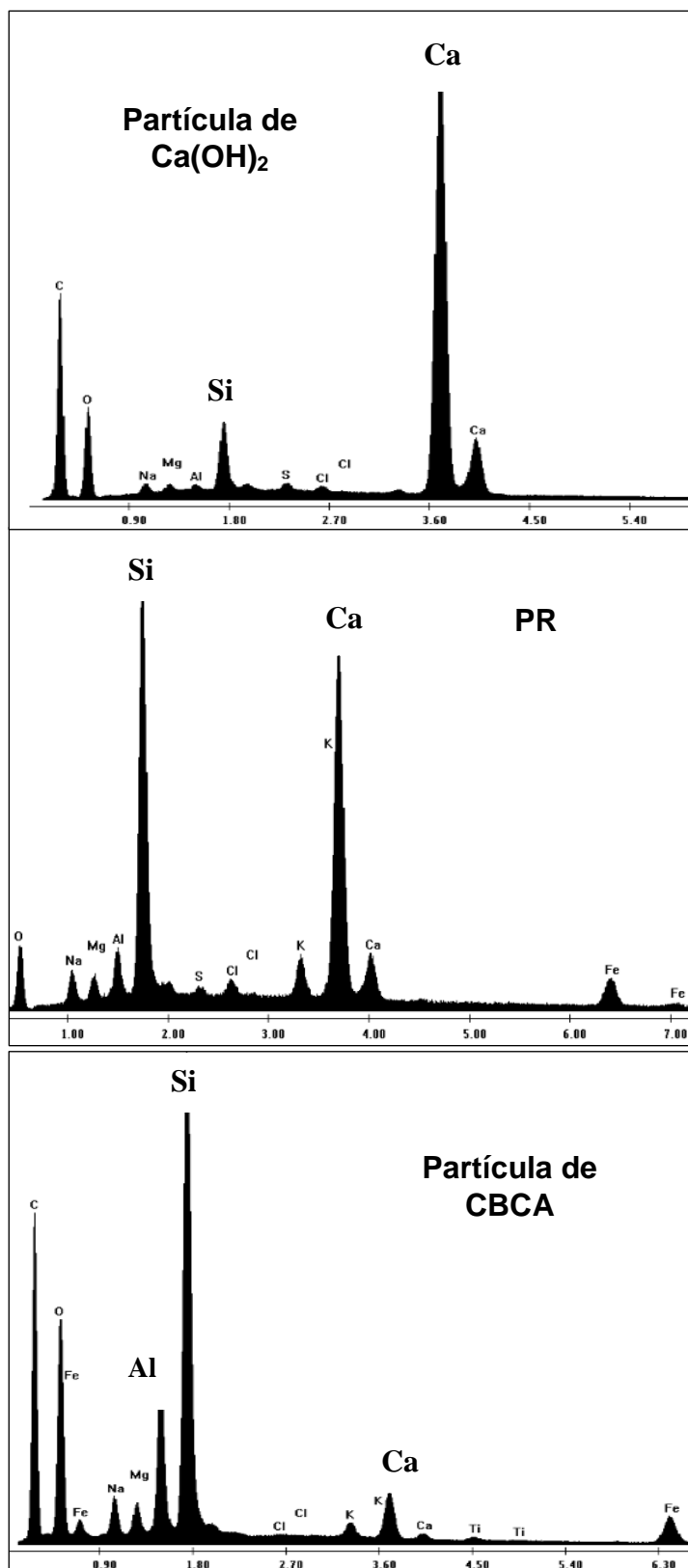


Figura 36. Espectros obtenidos por EDS para el sistema CCA-16 a 28 días

8.5.2 Composición química de los productos de reacción mediante el análisis puntual por EDS

Se analizó la composición química de los productos de reacción formados en las pastas curadas a 3 y 28 días para los sistemas CCA-7 y CCA-16. Para cada muestra se llevaron a cabo una serie de análisis puntuales, en total 30 microanálisis con un tiempo de 50 s para cada caso. Con los datos obtenidos se calcularon las relaciones atómicas, para identificar la presencia de diferentes tipos de productos de reacción.

Los elementos analizados fueron Si, Al y Ca, los resultados se presentan en forma gráfica en diagramas ternarios Si-Ca-Al con los porcentajes atómicos y en diagramas binarios con las relaciones atómicas Al/Ca vs. Si/Ca . En los resultados se agregaron también las relaciones atómicas nominales de cada sistema, es decir las composiciones teóricas, asumiendo que la solución alcalina adicionada a la CBCA reaccionó al 100%.

Sistema CCA-7

En la

Figura 37 se presentan los resultados gráficos de los análisis químicos puntuales para la pasta CCA-7 a 3 días de curado, que fue activada con 5%Na₂O.

La **Tabla 25** muestra las relaciones atómicas promedio obtenidas del análisis de PR, las relaciones atómicas de CBCA sin reaccionar y las relaciones atómicas teóricas. La composición nominal está referida a la composición química del sistema o de la mezcla al ser preparada, se muestra en las relaciones atómicas Si/Ca, Al/Ca y Si/Al, ya que son las relaciones atómicas que se están estudiando.

Tabla 25. Valores promedios de las relaciones atómicas por EDS para el sistema CCA-7

	CBCA sin reaccionar	Composición Nominal del sistema	PR a 3 días	PR a 28 días
Si/Ca	13.38	1.901	2.131	2.30
Al/Ca	1.26	0.107	0.244	0.35
Si/Al	10.62	17.703	2.419	1.31

La **Tabla 25** infiere que la relación atómica de Si/Al de los PR de los sistemas a 3 (Si/Al=2.419) y 28 días (Si/Al=1.31) fue menor que la relación atómica inicial del sistema (Si/Al=17.703) al momento de su preparación, esto indica que conforme avanza el tiempo, la CBCA va reaccionando dando lugar a PR íntimamente mezclados en la matriz, el gel geopolimérico C-A-S-H y el gel de sílice C-S-H.

En el diagrama ternario,

Figura 37 (a), se observó que la mayoría de los análisis de PR se encuentran agrupados en la zona rica al Ca y se ubicaron cercanos entre sí y dentro de la misma zona de composición. El producto de reacción de la activación de 70%CBCA con 5%Na₂O y 30%CaO tiene una composición química promedio de Si=60.96%, Ca=32.83% y Al=6.21%. La

Figura 37 (b) muestra los PR de Si/Ca vs. Al/Ca, se observó una amplia variabilidad de la composición de los PR y una notable lejanía de la composición nominal. La relación atómica Si/Al=2.419 de los PR a 3 días tuvo un valor inferior a la composición nominal (Si/Al=17.703) y a la CBCA sin reaccionar (Si/Al=10.62) y esto sugiere que la mayoría de la CBCA reaccionó durante la activación química, para dar lugar a PR, siendo gel de sílice C-S-H el principal producto de reacción intermezclado con el gel geopolimérico C-A-S-H.

Sistema CCA-7(30%CaO-70%CBCA)

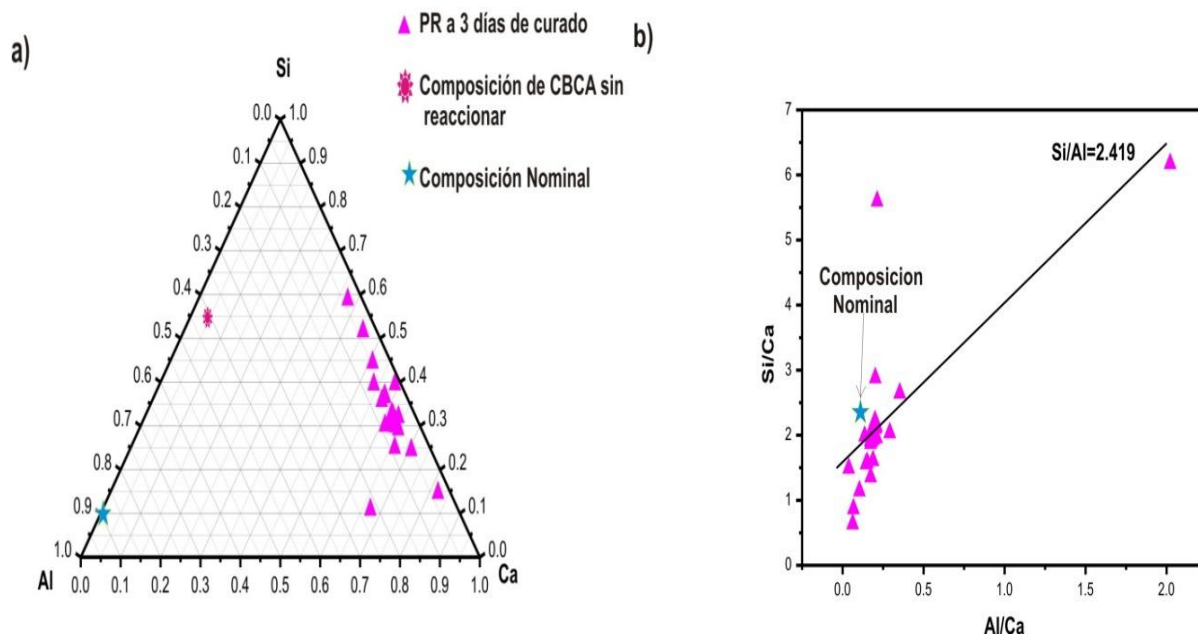


Figura 37. Composición química en % atómico de PR del sistema 30%CaO-70%CBCA a 3 días de curado. a)Si-Ca-Al b)Al/Ca vs. Si/Ca

La **Figura 38 (c)** corresponde al diagrama Ca-Si-Al del sistema CCA-7 a 28 días que fue activado con 5%Na₂O, se observó que la composición química promedio para los PR fue de Si=59.75%, Ca=32.63% y Al=7.64%. Puede observarse que el porcentaje de Al para los PR a 28 días es mayor que el que se obtuvo a 3 días, esto propone que el Al presente en la CBCA se difundió a través de los AR

formados en la microestructura a 28 días para condensarse luego en una matriz de PR, puede observarse que la dispersión de datos de PR está próxima a la zona rica al Ca. La **Figura 38 (d)**, muestra que la relación atómica Si/Al de los PR fue de 1.31, lo que infiere que al día 28 hubo una mayor cantidad de CBCA reaccionada, esto quiere decir que la sílice de la CBCA está reaccionando para dar lugar a la formación del gel geopolimérico C-A-S-H.

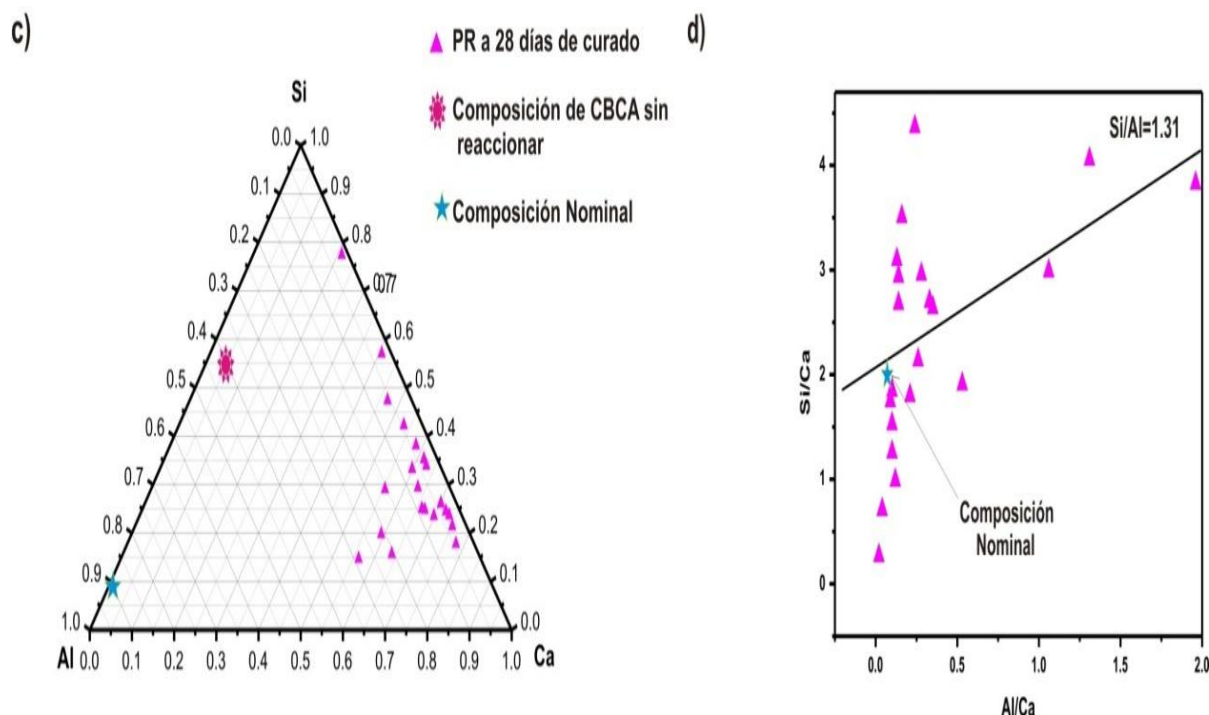


Figura 38. Composición química en % atómico de PR del sistema 30%CaO-70%CBCA a 28 días de curado. c)Si-Ca-Al d)Al/Ca vs. Si/Ca

Sistema CCA-16

La caracterización por MEB del sistema CCA-16 permitió la identificación de los productos de reacción localizados en la matriz de la pasta. En la **Tabla 26** se muestran los valores de las relaciones atómicas promedio de los productos de reacción para las pastas del sistema CCA-16 a 3 y 28 días de curado, además se adicionaron las relaciones atómicas de la CBCA sin reaccionar, así como las relaciones atómicas nominales o teóricas. Se observa de la **Tabla 26** la notable lejanía de las relaciones atómicas Si/Al de los PR a 3 y 28 días de la composición nominal, esto infiere que la CBCA a 28 días se encontró mayormente reaccionada.

Tabla 26. Valores promedios de las relaciones atómicas por EDS para el sistema CCA-16

	CBCA sin reaccionar	Composición Nominal del	PR a 3 días	PR a 28 días
--	---------------------	-------------------------	-------------	--------------

		sistema		
Si/Ca	13.38	1.901	1.409	1.505
Al/Ca	1.26	0.107	0.188	1.158
Si/Al	10.62	17.703	1.927	0.623

En la **Figura 39** se presentan los resultados por EDS en diagramas ternarios composicionales Ca-Si-Al y diagramas binarios composicionales Si/Ca vs. Al/Ca. En la **Figura 39 (a)** los resultados de los microanálisis por EDS para el sistema CCA-16 a 3 días de curado, que fue activado con un 5%Na₂O se presentan graficados en un diagrama ternario composicional. Se observó que la composición química promedio fue para PR de Si=51.54%, Ca=41.68% y Al=6.78%. Puede observarse que los PR se encuentran cercanos a la zona rica en Ca, sin embargo es importante destacar que algunos PR están cercanos a la zona rica en Si, con esto no puede aseverarse que exista otro PR distinto al gel *C-S-H*, ya que esta técnica tiende a un error involuntario durante su medición (Gaitán & Tórrez, 2013). Los resultados de las relaciones atómicas Al/Ca vs. Si/Ca se presentan en la **Figura 39 (b)**, para PR la relación Si/Al=1.927, de esto puede deducirse que consisten en un gel de silicoaluminatos que se componen principalmente de la reacción de la CBCA, aunque es importante mencionar que este valor no fue superior al nominal, indicando que no toda la CBCA está reaccionando para formar el gel de sílice *C-S-H*.

Sistema CCA-16(30%Ca(OH)₂-70%CBCA)

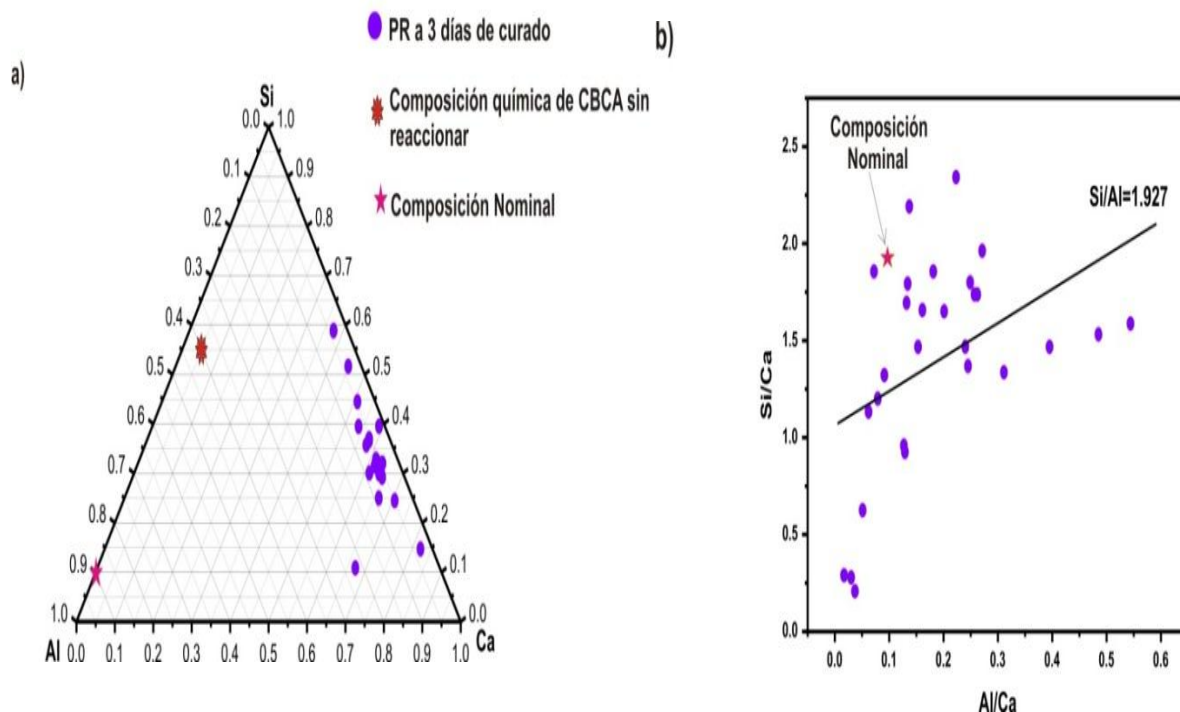


Figura 39. Composición química en % atómico de PR del sistema 30%Ca(OH)₂-70%CBCA a 3 días de curado. a)Si-Ca-Al b)Al/Ca vs. Si/Ca

En la **Figura 40 (c)** correspondiente al diagrama ternario Ca-Si-Al de los productos de reacción del sistema CCA-16 a 28 días de curado, es interesante observar la alta dispersión de datos de los PR, puesto que los PR están dispersos tanto a la zona rica en Al y Ca, lo que infiere en la poca homogeneidad química existente en la matriz de productos de reacción y se observó una composición química de PR promedio de Si=37.41%, Ca=33.41% y Al=29.18%. La **Figura 40 (d)** muestra que la relación atómica Si/Al=0.623 de los PR fue menor que las relaciones atómicas de la CBCA sin reaccionar (Si/Al=10.62) y composición nominal (Si/Al=17.703), lo que infiere que un mayor contenido de CBCA está reaccionado al día 28, además la amplia dispersión de datos de las relaciones atómicas Al/Ca vs. Si/Ca indica la formación de PR de composición química variable del tipo gel de sílice *C-S-H* y probablemente el gel geopolimérico *C-A-S-H*.

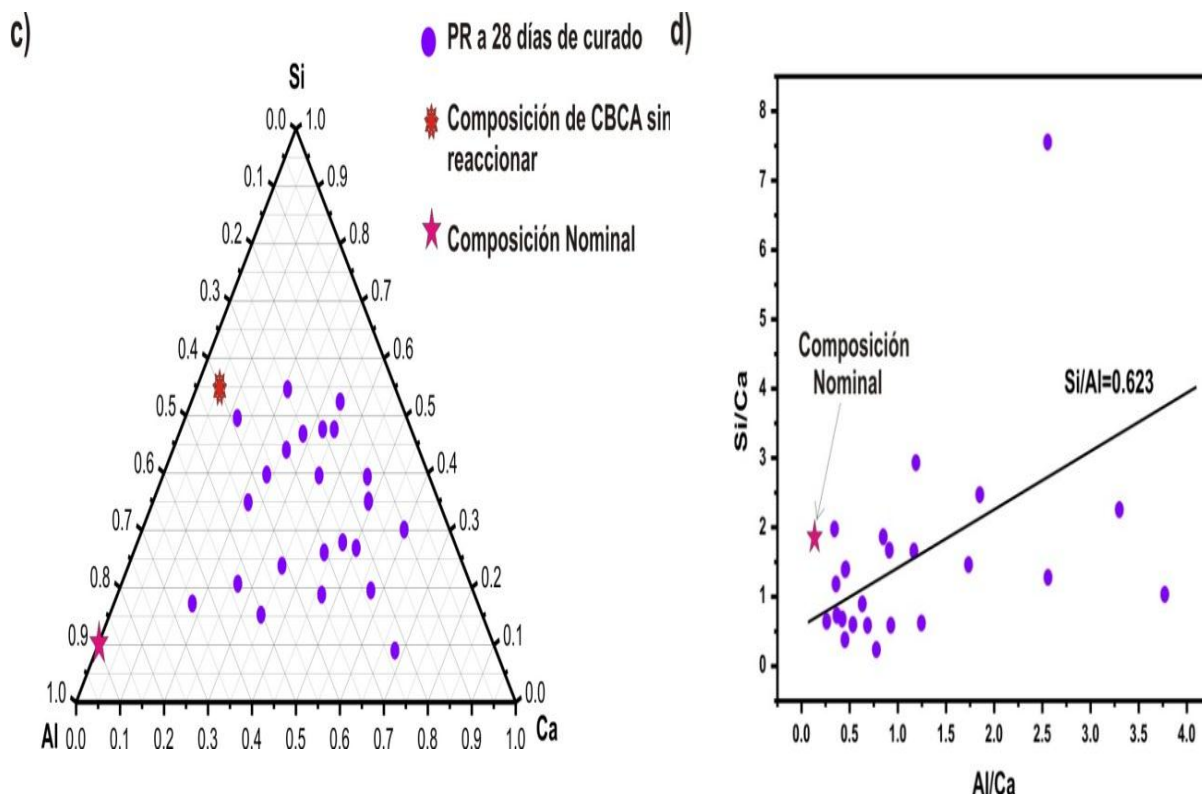


Figura 40. Composición química en % atómico de PR del sistema 30%Ca(OH)₂-70%CBCA a 28 días de curado. c)Si-Ca-Al d)Al/Ca vs. Si/Ca

8.6 Resultados de Difracción de Rayos X

Se caracterizaron por DRX los sistemas de pastas, cuyas formulaciones en morteros presentaron resistencia mecánica de 5 MPa aproximadamente al día 28. Estas formulaciones corresponden a CCA-5, con una resistencia de 4.8 MPa, con un contenido de 20%CaO y 10%Na₂O, CCA-7 con una resistencia de 5.1 MPa, con un 30%CaO y 5%Na₂O, CCA-9 con una resistencia de 5.4 MPa, con un 30%CaO y

15%Na₂O y CCA-16 con una resistencia de 5.5 MPa, con un 30%Ca(OH)₂ y 5%Na₂O. No se caracterizaron muestras de mortero, debido a que el agregado fino interfiere en los análisis.

En la **Figura 41** se muestran los resultados de DRX de los sistemas con 20 y 30%CaO, respectivamente. De acuerdo a esta figura, se puede observar un pico alrededor de los $2\theta=30^\circ$ correspondiente al *C-S-H*, exactamente a $2\theta=29.39^\circ$, el cual se forma en el momento en que entran en contacto los activadores alcalinos (NaOH y CaO) con la CBCA, presumiblemente el Ca rompe enlaces y se libera. Posteriormente éste se enlaza con el Si de la CBCA y el agua disponible en el activador alcalino y agua libre añadida, de esa manera se empieza a formar el gel de sílice *C-S-H*.

En ambos sistemas hidratados, la *anortita*, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, y la *calcita*, CaCO_3 , se encuentran presentes a 28 días de curado, en el sistema CCA-5 la reflexión mayor de *anortita* está en $2\theta=27.78^\circ$, se logra observar también que está presente en $2\theta=23.35, 24.39, 35.60$ y 42.93° , lo cual indica que no han reaccionado todas las fases cristalinas de silicoaluminatos. En $2\theta=43.14^\circ$ se observa también una reflexión de *calcita*. En el sistema CCA-9 también puede observarse que están presentes las mismas fases (*anortita* y *calcita*), la reflexión mayor de *anortita* se encuentra en $2\theta=28.03^\circ$, encontrándose también en $2\theta=22.79, 23.07, 23.67, 24.10$ y 35.81° .

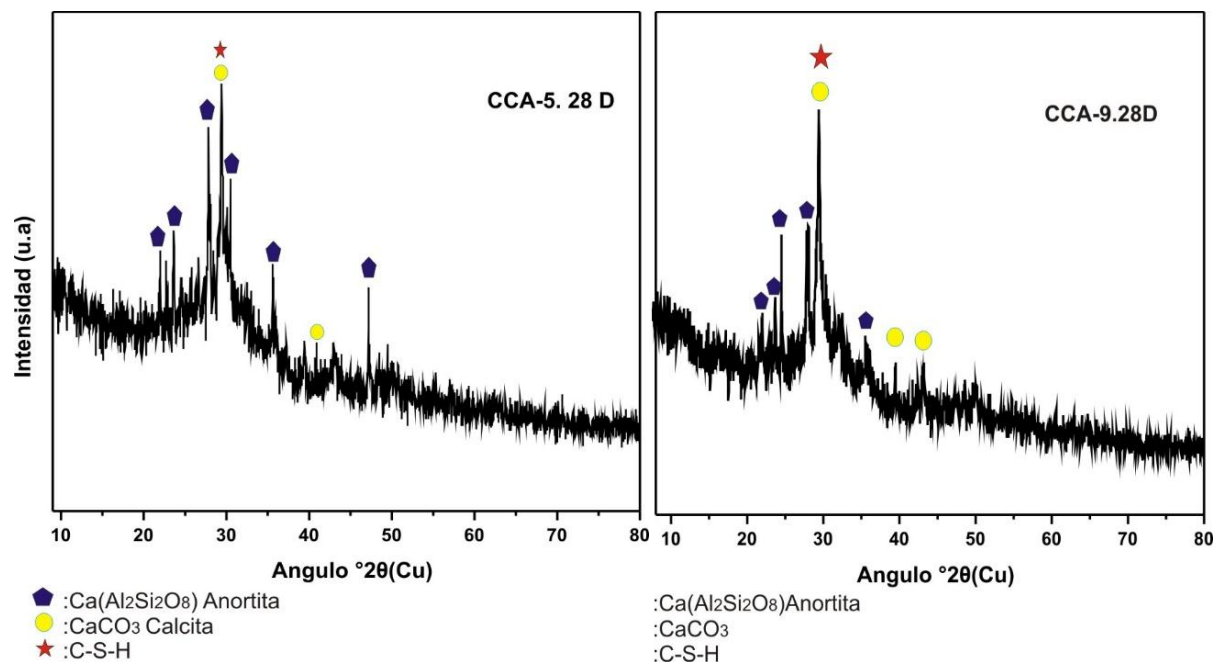


Figura 41. Patrones de DRX de pastas de CaO/ CBCA

La presencia de las fases cristalinas disminuye conforme el CaO reemplaza a la CBCA. Se observa que el halo amorfo de la CBCA sigue estando en el rango $2\theta=20-40^\circ$, sin embargo se observa que se recorre hacia la derecha, lo cual se debe a los cambios estructurales que sufre el material al formar la red de

silicoaluminatos. La evaluación de las intensidades del pico *C-S-H* es complicada por sobreponerse con el pico de CaCO_3 , además de estar sobrepuesto con el halo amorfo de la CBCA sin reaccionar.

La formación de *calcita* se debe a la hidratación del CaO con el agua libre añadida, de manera que se forma la *portlandita*, Ca(OH)_2 , seguidamente ocurre una carbonatación debido a la reacción de la *portlandita* con el CO_2 de la atmósfera (Burciaga, 2010).

En la **Figura 42 y**

Figura 43 se presentan los patrones de DRX de CCA-7 y CCA-16 respectivamente, los sistemas que presentaron los valores mayores de resistencia mecánica al día 28. Es importante mencionar que estos sistemas tienen en la matriz geopolimérica distinta fuente de Ca, pero en ambas formulaciones la CBCA se sustituyó por la fuente de Ca en un 30% y 5% Na_2O .

En estos sistemas se logra observar que el halo amorfo de la CBCA se recorre hacia la derecha, lo cual como se mencionó anteriormente se debe a cambios estructurales que sufre la CBCA para formar la red de silicoluminatos. En CCA-7 a 3 días las reflexiones de *anortita* están en $2\theta=27.91^\circ$ y 26.50° , a 7 días se encuentra en $2\theta=27.27^\circ$ y 36.40° , a 14 días en $2\theta=22.87^\circ$, 24.04° y 29.75° y a 28 días se encuentra en $2\theta=25.08$, 25.22 y 35.40° , se puede decir que las intensidades de *anortita* aumentan dentro del rango en $2\theta=24.04$ y 35.40° .

Se observa también que la *calcita* está presente desde el día 3 de curado de las pastas, a 3 días se encuentra en $2\theta=29.12^\circ$, a 7 días en $2\theta=29.71^\circ$, a 14 días en $2\theta=29.45$ y 43.21° , y a 28 días en $2\theta=29.36^\circ$. Puede verse como existen diferencias de intensidades en las reflexiones, siendo a 28 días la mayor intensidad, lo que indica que las superficies de los cristales se atacan con el paso del tiempo debido al medio alcalino en el que se encuentran.

Se presentan también en la

Figura 43 los resultados del sistema CCA-16, donde se observa el patrón de DRX de la CBCA, Ca(OH)_2 y el sistema con 70%CBCA y 30% Ca(OH)_2 , de acuerdo a esta figura la CBCA presenta una estructura amorfa, donde se distingue la presencia de fases cristalinas tales como *albita*, $\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$, y *anortita*; y las fases del Ca(OH)_2 son *portlandita* y *calcita*, puede notarse que la *calcita* está en $2\theta=29.20^\circ$. Sin embargo se puede observar que las fases de *portlandita* ya han reaccionado, ya que no se observan en los patrones de las pastas geopoliméricas a ningún día de estudio.

La reacción de la *portlandita* con el CO_2 de la atmósfera produjo la *calcita*. La presencia de *portlandita* es importante, ya que al reaccionar con la sílice de la CBCA, produce el compuesto neutro de *C-S-H*, el cual confiere las propiedades mecánicas de compresión adecuadas. Sin su presencia, durante el curado de las muestras, la resistencia mecánica disminuye de manera paulatina con el incremento de la sílice en la relación Ca/Si.

La principal fase de hidratación en las pastas es el *C-S-H*, cuando el silicoaluminato es hidratado, los compuestos reaccionan con H_2O para adquirir estados estables de baja energía y el proceso es acompañado con una liberación de calor. Es importante mencionar que el *C-S-H* no posee una estructura cristalina, sino que su estructura es pobremente cristalina, lo que dificulta el análisis del gel *C-S-H* por medio de la técnica de DRX. Además de lo mencionado anteriormente, que la fase de *calcita* se traslapa con la de *C-S-H*. Logra observarse que conforme avanzan los días el halo amorfo de la CBCA se mueve hacia la derecha, debido a los cambios estructurales que sufre la CBCA al formarse la red de silicoaluminatos. Sin embargo las fases de *anortita* siguen estando presentes, a 3 días están en $2\theta = 21.99^\circ$ y 26.18° , a 7 días está en $2\theta = 28.96^\circ$, a 14 días está en $2\theta = 28.69^\circ$ y a 28 días está en $2\theta = 27.51^\circ$ y 28.13° .

En cambio la *calcita* está a 3 días en $2\theta = 29.44^\circ$, a 7 días en $2\theta = 29.39^\circ$, a 14 días en $2\theta = 29.60^\circ$ y a 28 días en $2\theta = 29.29^\circ$. Puede observarse que los ángulos de la reflexión de *calcita* en las fechas de estudio son similares. Lo que indica que la reacción no presenta un avance significativo conforme avanzan los días de curado ni existen cambios en las reflexiones de difracción al día 28.

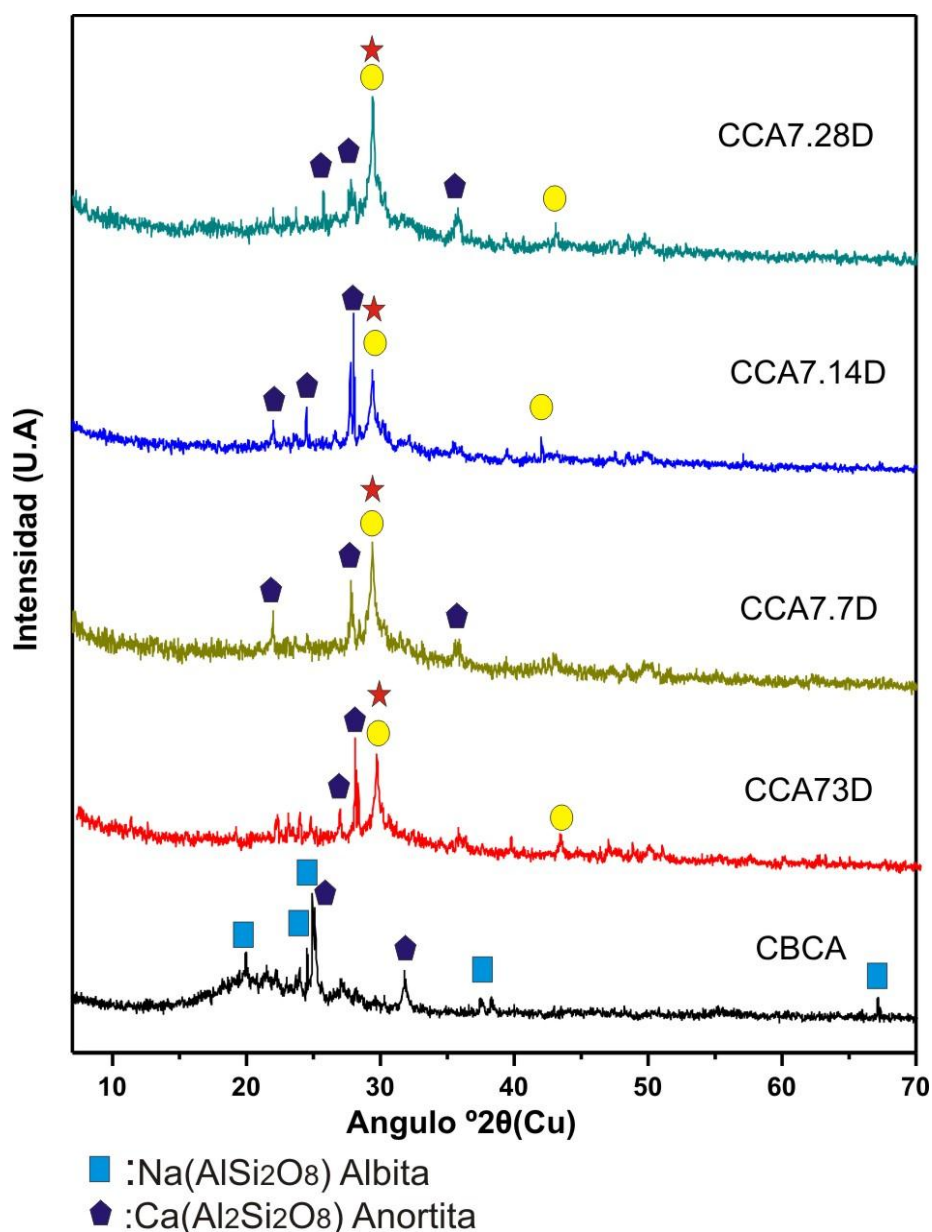


Figura 42. Patrones DRX de pastas de CaO/CBCA

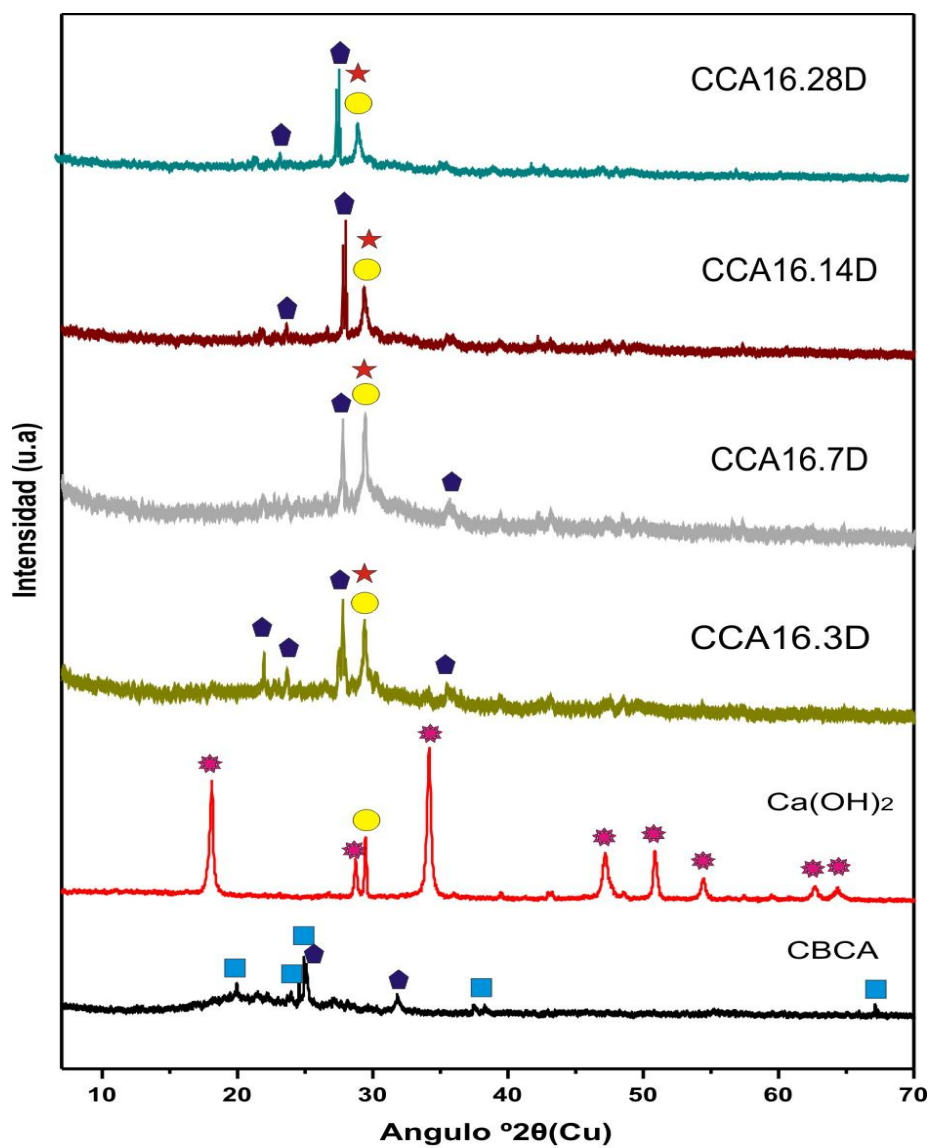


Figura 43. Patrones DRX de pastas de $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ **8.7 Resultados de Análisis Térmico Diferencial**

En la **Figura 43**, **Figura 45** y

Figura 46 se muestran los resultados de ATG/ATD obtenidos para muestras de pastas geopoliméricas de CaO/CBCA , e $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$, respectivamente, los sistemas analizados correspondieron a aquellos donde la resistencia mecánica a la compresión fue igual o superior a 5 MPa. Para los sistemas CCA-7 y CCA-16 se realizó el historial de análisis térmico a 3, 7, 14 y 28 días. Los análisis se realizaron con una velocidad de calentamiento de $15^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta 1200°C . Adicionalmente, en la **Tabla 27** se presentan los datos numéricos de pérdidas en peso de las muestras a 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200°C . Las curvas de color azul indican el análisis termogravimétrico (ATG) y las curvas de color rojo indican el análisis térmico diferencial (ATD).

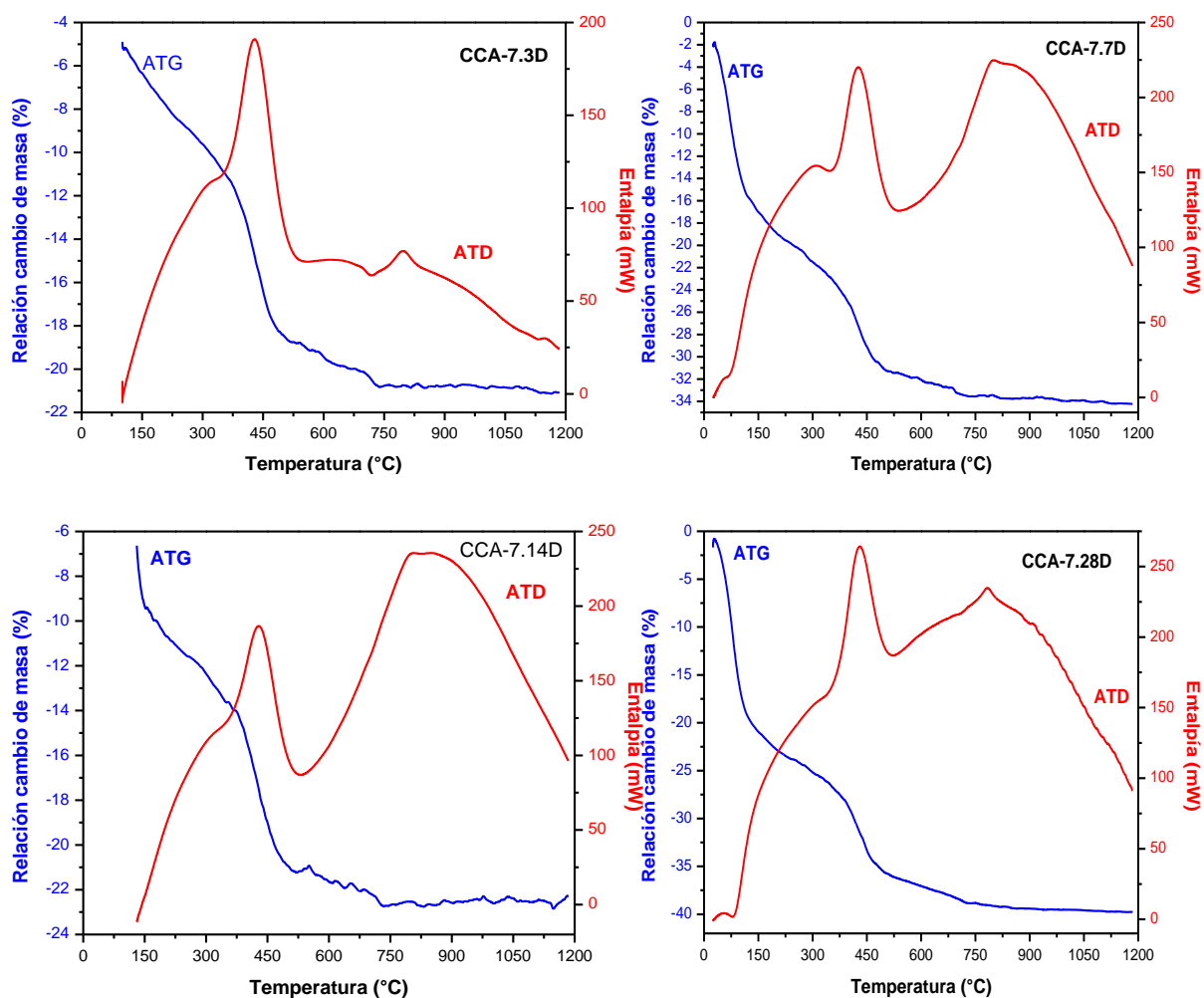


Figura 44. ATG y ATD del sistema CCA-7 a 3, 7, 14 y 28 días

En la **Figura 45** se muestran los termogramas para los sistemas CCA-5 y CCA-9 a 28 días.

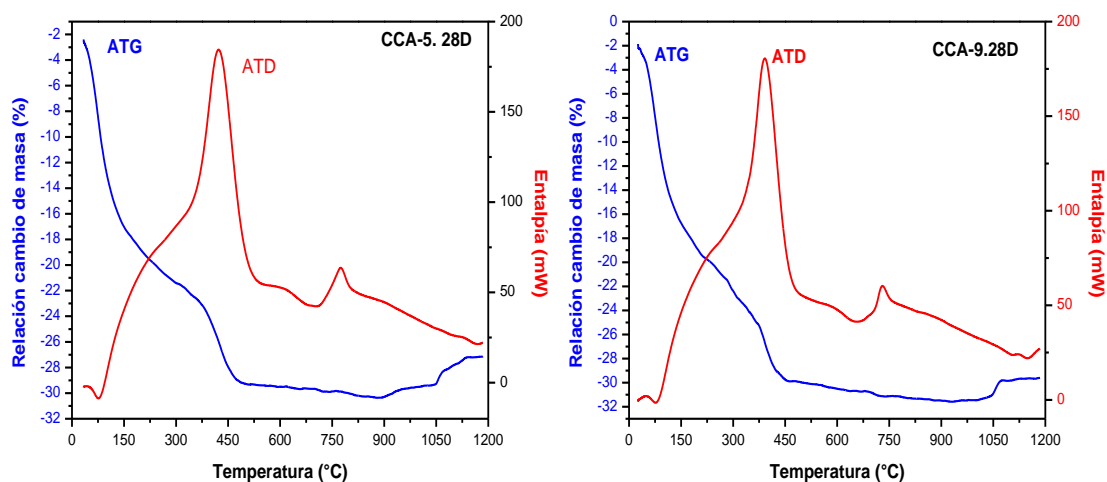
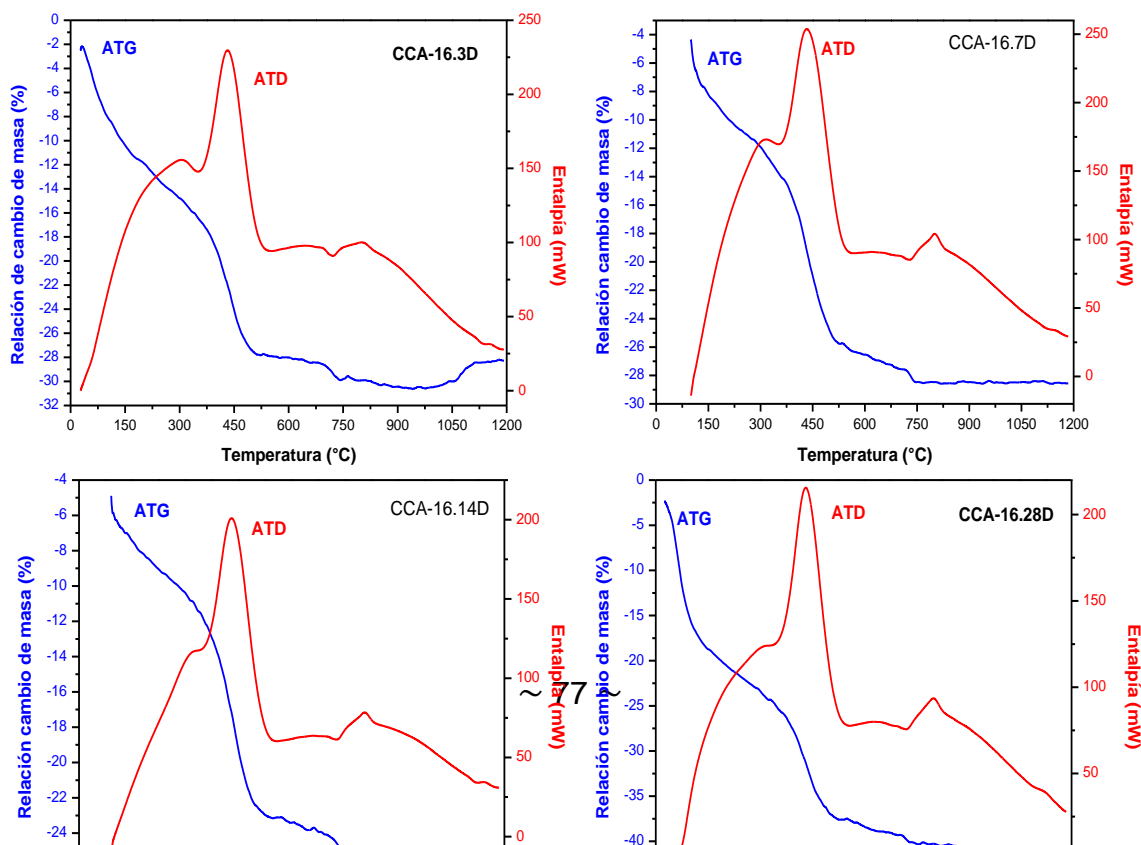
**Figura 45. ATG y ATD de CCA-5 y CCA-9 a 28 días**

Figura 46. ATG y ATD del sistema CCA-16 a 3, 7, 14 y 28 días
Tabla 27. % de pérdida en peso de los sistemas CCA-7, 30%CaO/CBCA, CCA-16, 30%Ca(OH)₂/70%CBCA, CCA-5, 20%CaO/80%CBCA y CCA-9, 30%CaO/70%CBCA

%Pérdidas en peso										
CCA-7					CCA-16				CCA-5	CCA-9
T (°C)	3 días	7 días	14 días	28 días	3 días	7 días	14 días	28 días	28 días	
200	3.14	17.17	3.77	21.98	10.04	5.96	4.08	18.39	16.57	17.41
400	7.04	22.92	7.75	27.23	15.41	10.86	8.62	24.99	20.39	23.95
600	14.55	30.03	14.98	35.97	25.83	22.19	18.52	35.76	27.11	28.34
800	15.64	31.66	15.51	38.31	27.60	24.12	20.19	37.80	27.60	28.98
1000	15.85	32.10	15.09	38.38	28.31	24.15	20.20	38.36	27.12	29.19
1200	15.87	32.43	15.63	38.60	25.95	24.21	20.02	39.26	24.74	27.31

En general para todas las muestras en la

Figura 44, **Figura 45** y

Figura 46, la pérdida de peso atribuida a la evaporación de agua absorbida comenzó por encima de la T ambiente y continuó aproximadamente hasta los 300°C. Se cree que al menos el 80% de la pérdida en peso para cementos activados químicamente ocurre por debajo de los 200°C (Burciaga, 2010). A esta temperatura el sistema que mostró mayor y menor pérdida en peso fue CCA-7 a 28

días (del 21.98%) y a 3 días (del 3.14%), respectivamente. El pico presente a 100°C, indica la pérdida de peso de *C-S-H*. El *C-S-H* pierde agua en un amplio rango de temperatura; pero la pérdida máxima se produce a 120-160°C, este proceso es endotérmico, es decir la muestra absorbe calor. En el rango de 300-700°C las pérdidas en peso ocurrieron por efecto de la liberación de agua químicamente enlazada en las microestructuras (Burciaga, 2010).

En todos los sistemas existió la presencia de Ca(OH)_2 , cabe destacar que los sistemas CCA-5, CCA-7 y CCA-9 fueron activados con CaO , pero debido a que el CaO reacciona vigorosamente con el H_2O , se obtuvo como producto el Ca(OH)_2 . Pero los diagramas de fases de DRX no indican la presencia de Ca(OH)_2 en las pastas hidratadas y endurecidas. En las pastas de Cal-CBCA, el Ca(OH)_2 parece ser totalmente consumido después de tres días. Hay dos posibilidades para la reacción del Ca(OH)_2 . La primera es con la sílice reactiva de la CBCA para formar fases de *C-S-H*. La segunda es con el CO_2 del aire para formar CaCO_3 .

En el rango de temperatura de 400, 425 y 700°C se observaron cambios de pendientes en los diagramas ATD de la

Figura 44, **Figura 45** y

Figura 46, los cuales se atribuyen a la descomposición o deshidroxilación del Ca(OH)_2 . El cambio de pendiente a la temperatura cercana a 700°C, probablemente es causado por la liberación de CO_2 en la descomposición de CaCO_3 , que fue formada por carbonatación. Entre 800 y 1200°C las pérdidas de peso cesaron, para dar lugar a procesos de formación de fases cristalinas y semi-cristalinas, a 835-900°C se da la recristalización de *C-S-H*, cuyo proceso es endotérmico, durante este proceso ocurre la formación y reformación de enlaces covalentes (Burciaga, 2010). A 1200°C los sistemas CCA-7 y CCA-16 a 28 días presentaron pérdidas totales en peso del 38.60 y 39.26%, respectivamente. En cambio los sistemas CCA-5 y CCA-9 presentaron pérdidas totales a 28 días de 24.74 y 27.31%, respectivamente.

8.8 Discusión general del mecanismo de reacción

En esta sección se presenta una discusión detallada sobre los mecanismos de reacción que ocurren durante la activación química de sistemas a base de CBCA, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaO , sin embargo es importante mencionar que aunque los procesos de reacción para este tipo de pastas no han sido investigados de manera detallada, los resultados obtenidos en esta investigación acerca de la activación de la CBCA con la fuente de Ca e NaOH permiten obtener información sobre los posibles procesos que pueden ocurrir cuando la CBCA y la fuente de Ca se combinan en un sólo cemento alcalino.

Los procesos de la reacción de geopolimerización inician cuando la solución alcalina, en este caso el NaOH entra en contacto con la CBCA, ocurriendo un proceso de hidrólisis de los iones OH^- y cationes monovalentes Na^+ del agente activante sobre las superficies de las partículas de CBCA y posteriormente ocurre la disolución del silicoaluminato. Durante este proceso se destruyen los enlaces covalentes Ca-O, Al-O-Si y Si-O-Si, que están presentes en la fase amorfa del silicoaluminato (Burciaga, 2010).

Seguidamente ocurre la formación de distintas especies complejas; monómeros, dímeros, trímeros y oligómeros, de igual manera se da la precipitación de especies. Durante este proceso la velocidad de formación de especies de monómeros es mayor que la velocidad de precipitación de las especies de Si y Al, que consisten principalmente en $\text{Si}(\text{OH})_4$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (Burciaga, 2010). En esta etapa los precursores geopoliméricos alcanzan un estado termodinámicamente más estable, ya que presentan aún movilidad para reorientarse, antes de que las pastas geopoliméricas se gelifiquen mediante el proceso de condensación (Burciaga, 2010).

En las pastas se dio la disolución continua de especies precursoras, aumentando los niveles produciéndose una saturación de especies, favoreciéndose la condensación del gel de sílice *C-S-H* y el gel geopolimérico *C-A-S-H*, debido a la rápida condensación, los procesos de reacción quedan pendientes y una proporción significativa del agente activante condensa como el gel de sílice, el cual está finamente mezclado en los intersticios de la matriz de productos de reacción. Durante esta etapa se da la expulsión parcial de agua de la matriz de PR; pero parte de esta humedad queda retenida en las cavidades de la matriz y en los poros del material cementoso. En las pastas se dio la precipitación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que al reaccionar con el CO_2 atmosférico dio lugar a la formación de CaCO_3 , ocasionando una disminución en las propiedades mecánicas (Burciaga, 2010).

El mecanismo de reacción posterior a la condensación, ocurre en estado sólido, obteniéndose las microestructuras de las pastas con baja RMC y con un alto contenido de CBCA sin reaccionar al día 28 y con una matriz de productos de reacción poco densa.

IX. CONCLUSIONES

En base a las pruebas realizadas y de los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones:

Se determinó el efecto de la variación del %Na₂O añadido en forma de NaOH, sobre la RMC de morteros curados a 20, 40 y 20-60-20°C, los resultados obtenidos por medio de ensayos de resistencia mecánica demuestran que a menor porcentaje de Na₂O (menor 10%) se obtienen los mejores valores de RMC, además el estudio de las microestructuras de las pastas de los sistemas con alta RMC mediante MEB, mostró que la formación del gel de sílice *C-S-H* se ve favorecida con bajos contenidos de Na₂O y los resultados de DRX confirmaron la presencia del gel semicristalino *C-S-H*, que se traslapa con la CaCO₃ en $2\theta=30^\circ$, sugiriendo que la composición del agente activante determina el mecanismo de los procesos de reacción y la formación de productos de reacción.

Los resultados obtenidos por medio de ensayos de resistencia a la compresión en morteros, determinan que la adición a la matriz cementante en un 10, 20 y 30%CaO tuvo un efecto positivo en la ganancia de RMC a 28 días, presentando un mejor desarrollo en la resistencia de estos morteros, que aquellos donde se adicionó Ca(OH)₂ en los mismos niveles, sugiriendo que la sustitución de CBCA por CaO en un 30% determina valores altos de RMC, esto se pudo comprobar al realizar el análisis estadístico, que arrojó que con un 30%CaO, 70%CBCA y 5%Na₂O sería la formulación óptima que permite maximizar la RMC, con la diferencia que la temperatura de curado para esta formulación debe ser de 40°C, difiriendo de la temperatura de curado, 20-60-20°C que se utilizó en la formulación que arrojó el valor más alto de RMC a 28 días.

La caracterización microestructural por MEB de las pastas mostraron una matriz de productos de reacción de tonalidad gris oscura, poco densa y con alta presencia de poros, y los análisis de ATG-ATD mostraron que los procesos de reacción de pérdida de humedad en las pastas ocurren endotérmicamente, y que debido a la formación de CaCO₃, la reacción no avanza considerablemente al día 28, produciéndose una disminución de las propiedades mecánicas, cabe mencionar que el sistema que obtuvo un mayor valor de RMC se sometió a un TT de 20-60-20°C, lo que indica que el incremento de la temperatura produce un efecto positivo en el aumento de la resistencia a la compresión; sin embargo esto induce la rápida evaporación de humedad, inhibiendo así el avance de las reacciones posteriores al proceso de condensación, es por eso que las microestructuras de las pastas observadas presentaron a 28 días un alto contenido de partículas de CBCA sin reaccionar.

En las pastas con 30%CaO y 30%Ca(OH)₂ se condensaron dos tipos de PR. El primer producto localizado en las fronteras de las partículas de CBCA, que según los resultados por EDS, está formado por el gel geopolimérico *C-A-S-H*. Un segundo producto de reacción se localizó en la matriz, rico en Si, Ca y Al, el cual se generó por la reacción mayoritaria de las partículas de CBCA, dando lugar al gel de sílice *C-S-H*, infiriendo que el mecanismo de reacción de la CBCA fue por

disolución-gelificación-condensación, siendo atacada por los reactantes de la solución alcalina.

X. RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo las formulaciones óptimas, obtenidas mediante el análisis estadístico y comprobar si la resistencia mecánica de los morteros aumenta con una temperatura de curado de 40°C.
- La sustitución de CBCA por Ca(OH)_2 en hasta un 30%, no siendo necesaria la utilización de la cal viva, puesto que se requiere de una temperatura de 900°C para su obtención, a fin de producir un cemento alcalino de bajo impacto ambiental y buena resistencia mecánica.
- Realizar pruebas previas de activación química de la CBCA con diferentes tamaños de partículas y determinar el efecto sobre la resistencia mecánica de los cementos alcalinos.
- Reducir al máximo el contenido de agua en las pastas y morteros, utilizando aditivos superplastificantes reductores de agua, ya que valores altos de la relación Ag/L ocasionan un colapso en la resistencia mecánica.
- Disminuir los porcentajes de ceniza de bagazo utilizados, con el fin de observar cómo influyen en la ganancia de resistencia mecánica a la compresión.

XI. NOMENCLATURA

Abreviaturas

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CP	: Cemento Portland
CBCA-P	: Ceniza de bagazo de caña de azúcar pulverizada
CBCA-SP	: Ceniza de bagazo de caña de azúcar sin pulverizar
Cinvestav	: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
Conacyt	: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
EAH	: Escoria de Alto Horno
D	: Día
DE	: Desviación Estándar
DOE	: Diseño Ortogonal Experimental
IQUISA	: Industria Química del Istmo, Sociedad Anónima
IPN	: Instituto Politécnico Nacional
MEss	: Masa Específica saturada y superficialmente seca
MP	: Materia Prima
Msss	: Masa saturada y superficialmente seca
NMX	: Norma Mexicana
ONNCCE	: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación
PPI	: Pérdidas por ignición
Ag/L	: Relación agua/ligante
Ar/L	: Relación arena/ligante
RMC	: Resistencia mecánica a la compresión
S/N	: Señal/Ruido
T	: Temperatura
TT	: Tratamiento Térmico

Materiales

H ₂ O	: Agua
Ar	: Arena sílice
CBCA	: Ceniza de bagazo de caña de azúcar
Ca(OH) ₂	: Hidróxido de calcio
NaOH	: Hidróxido de sodio
CaO	: Óxido de calcio

Fases de la CBCA

Na(AlSi ₃ O ₈)	: Albita
Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	: Anortita

Fases de Ca(OH)₂

Ca(CO₃) : Calcita
 Ca(OH)₂ : Portlandita

Otros símbolos químicos

HCl : Ácido clorhídrico
 Al₂O₃ : Alúmina
 NH₄ : Amonio
 M : Catión que corresponde a sodio o potasio
 SO₂ : Dióxido de azufre
 CO₂ : Dióxido de carbono
 SiO₂ : Dióxido de silicio
 KOH : Hidróxido de potasio
 R : Ion alcalino del tipo sodio, potasio o litio
 Al⁺³ : Ion Aluminio
 Ba⁺ : Ion Bario
 Ca⁺ : Ion Calcio
 H₃O⁺ : Ion hidronio
 Li⁺ : Ion Litio
 OH⁻ : Ion Oxhidrilo
 Na⁺ : Ion Sodio
 K⁺ : Ion Potasio
 SiO₂/M₂O : Módulo de silicato de sodio o potasio
 NO_x : Óxido de nitrógeno
 Na₂O : Oxido de sodio
 C-H-S : Silicato de calcio hidratado
 C-A-S-H : Silicoaluminato de calcio hidratado
 Si : Silicio
 Na₂SiO₃ : Silicato de sodio
 AlO₄ : Tetra óxido de aluminio
 SiO₄⁻ : Tetra óxido de silicio

Unidades

Å : Angstrom
 cm : Centímetro
 cm² : Centímetro cuadrado
 dm³ : Decímetro cúbico
 °C : Grados Celsius
 g : Gramos
 Ha : Hectárea
 h : Hora
 kg : Kilogramo
 kV : Kilo Volt
 MPa : Mega Pascal
 Hg : Mercurio

m	: Metro
m ³	: Metros cúbicos
mA	: Mili Ampere
mm	: Milímetro
mm ²	: Milímetro cuadrado
μm	: Micrómetro
min	: Minuto
M	: Molar
nm	: Nanómetro
Z	: Número atómico
in	: Pulgada
s	: Segundos
s/paso	: Segundo por paso
ton	: Tonelada

Técnicas de caracterización

ATD-ATG	: Análisis térmico diferencial y Análisis Termogravimétrico simultáneo
DES	: Detector de Electrones Secundarios
DFR	: Difracción de rayos X
ERD	: Electrones Retrodispersados
EFR	: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X
EDS	: Espectrometría por Dispersión de Energía
MEB	: Microscopia electrónica de Barrido

XII. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, W., & Galo, H. (4 de Marzo de 2013). Nicaragua necesita 957,000 viviendas. *LA PRENSA*, pág. 2C.
- Annual Book of ASTM Standards, V. 0. (1998). Feature Specifying Fly Ash For Use in Concrete. Estados Unidos.
- Balandrán, M. (2011). *Síntesis de geopolímeros mediante diferentes precursores*. Monterrey.
- Basolo, F., & Pearson, R. (1958). *Mechanisms of Inorganic Reactions*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Beleña, I., Tamayo, E., & Tendero, M. (2004). *Estudio y optimización de los parámetros de reacción para la obtención de material geopolimérico*. España.
- Bernal, S., Mejía de Gutiérrez, R., & Rodríguez, E. (2006). Nuevos concretos para el aprovechamiento de un sub-producto industrial. *IBEROMET IX*, 517-518.
- Borrachero, M., Akasaki, J., Castaldelli, V., Melges, J., Monzó, J., Payá, J., y otros. (2013). Use of Slag/Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) Blends in the Production of Alkali-Activated Materials. *Materials*, 1-2.
- Burciaga, O. (2010). *Compósitos metacaolín-escoria de alto horno: mecanismos de reacción y propiedades mecánicas, térmicas y químicas en función de la proporción de los componentes y composición del activante alcalino*. Ramos Arizpe.
- Caballero, E., & Sánchez, W. (2010). *Síntesis de nuevos cementos geopoliméricos a partir de subproductos del proceso de extracción de oro en la mina baja, distrito de California, Santander*. California.
- Calidra, G. (2011). *Grupo Calidra*. Recuperado el 10 de Junio de 2014, de <http://calidra.com/proceso/productos-calidra/>
- Camacho, A., & Meléndez, C. (Enero de 2009). *Aventuras del pensamiento*. Recuperado el 8 de Junio de 2014, de http://www.uach.mx/extension_y_difusion/synthesis/2009/08/20/espectrometria_de_flourescencia_de_rayos_X.pdf
- Carmona, P. (2011). Evaluación mecánica de pastas de cemento modificadas con escoria de horno de arco eléctrico y ceniza de bagazo de caña de azúcar. Veracruz.
- Conesa, J. (2000). *Curso básico de análisis térmico*. España: Editorial Club Universitario.
- Corporación, P. (2014). *Pantaleón*. Recuperado el 9 de Junio de 2014

- Davidovits, J. (1993). *From Ancient Concrete to Geopolymers*. Australia.
- Davidovits, J. (2002). *30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs*. Melbourne.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications*. Francia: Institut Géopolymère.
- Edificación, O. N. (2004). *NMX-C-021-ONNCCE-2004. Cemento para albañilería (mortero)- Especificaciones y métodos de prueba*. D.F.
- Escalante, J. (2002). Materiales alternativos al cemento portland. *Avance y Perspectiva vol.21*, 79-82.
- Fernández-Jiménez, A., Criado, M., & Palomo, A. (2006). Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators. *Materiales de Construcción, Vol 56, No 281*, 1-2.
- Forrester, J. A. (1970). A conduction calorimeter for the study of cement hydration, *Cement Technology*.
- Gaitán, J., & Tórrez, B. (2013). *Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar proveniente del Ingenio Monte Rosa sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de morteros de cemento tipo GU*. Managua.
- Gaspar, D. (1984). Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Normativa: clasificación y definiciones. *Materiales de construcción, Vol. 35, n.º200*, 76-77.
- Hernández, U. (2011). *Comportamiento mecánico y físico del mortero a base de CBCA como árido en aplanados en muros*. Xalapa.
- Jun, Y., & Kim, M. L. (2013). Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement and structural binder using ground granulated blast furnace slag. *ELSEVIER*(54).
- Magallanes, R. (2009). *Efecto de la formulación y las condiciones de curado sobre los productos de hidratación y desarrollo de propiedades en materiales de construcción a base de yeso*. Ramos Arizpe.
- Martínez, E. (2011). *Análisis y evaluación nano, micro y macro estructural de geopolímeros multifuncionales par su uso en ultra-thin composite pavements(Etapa Cero)*. México.
- Ortega, D. (2014). *Compósitos de desechos de vidrio-metacaolín activados por álcalis: efecto de la proporción vidrio:metacaolín, concentración Na₂O, composición del activante alcalino, temperatura de curado y área superficial del vidrio*. Ramos Arizpe.
- Parra, C. (2011). *Cementos alcalinamente activados a base de zeolitas naturales*. Guayaquil.

- Ríos, E. (2011). Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar(CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico. México.
- Rodríguez, A. (2010). *Evaluación de CBCA como sustituto parcial de CPO en concreto hidráulico, obtenida en el Ingenio de la Concepción*. Veracruz.
- Rodríguez, E. (2009). *Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuente de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos*. Valencia.
- Villarino, A. (2010). Materiales de construcción. La cal. *Materiales de construcción*, 23-24.

XIII.ANEXOS**Anexo 1. Análisis granulométrico**

Muestra: 100 gramos

Malla	Gramos que retiene	Gramos que pasan
3/8	0	100
4	0	100
8	0	100
16	0	100
30	2	98
50	82	16
100	14	2


Anexo 2. Módulo de finura

% Retenido	% Acumulado	% Pasa
0	0	100
0	0	100
0	0	100
0	0	100
2	2	98
82	84	16
14	98	2

$$MF = \frac{0 + 0 + 0 + 0 + 2 + 84 + 98}{100} = 1.84$$

Anexo 3. Proporcionamiento de las formulaciones de pastas y morteros de CaO/CBCA e Ca(OH)_2 /CBCA**a) Para pastas**

Para el cálculo de las proporciones de cada uno de los materiales dentro de la mezcla se hizo uso de la siguiente hoja de cálculo de Excel, en la cual se observa que tiene una pestaña que dice experimento, esta pestaña permite cambiar el nombre asignado al experimento, así como variar las condiciones dadas para el mismo, de modo que las cantidades del material necesario se ajustan acorde al experimento que se seleccione.

 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo																																									
Nombre:		Cinthy Valeska Castro Pérez			Área:	Cementos																																			
Materia Prima:		CBCA y CaO			Fecha:	/05/2104																																			
Tiempo de molienda:		C/M		Lote:	277.60 gramos																																				
Experimento	CCA-1																																								
Experimento	% CaO	%Na ₂ O	Temp de curado	% CBCA	Arena	Agua																																			
CCA-1	10	5	20	90		0.5																																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">%CBCA</td> <td style="width: 15%;">58.0%</td> <td style="width: 15%;">%Na₂O</td> <td style="width: 15%; border: 1px solid black;">5%</td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> </tr> <tr> <td>%CaO</td> <td>5.8%</td> <td>Arena/Ligante</td> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td>Ligante</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>%NaOH</td> <td>2.9%</td> <td></td> <td></td> <td>%solidos</td> <td>66.7%</td> <td></td> </tr> <tr> <td>%H₂O</td> <td>33.33%</td> <td>Agua/Ligante</td> <td style="border: 1px solid black;">0.5</td> <td>%agua</td> <td>33.3%</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="7" style="text-align: center;">100%</td> </tr> </table>							%CBCA	58.0%	%Na ₂ O	5%				%CaO	5.8%	Arena/Ligante		Ligante			%NaOH	2.9%			%solidos	66.7%		%H ₂ O	33.33%	Agua/Ligante	0.5	%agua	33.3%		100%						
%CBCA	58.0%	%Na ₂ O	5%																																						
%CaO	5.8%	Arena/Ligante		Ligante																																					
%NaOH	2.9%			%solidos	66.7%																																				
%H ₂ O	33.33%	Agua/Ligante	0.5	%agua	33.3%																																				
100%																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Material necesario</th> <th>Características</th> </tr> <tr> <th>Gramos de Na₂O</th> <th>Gramos</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td style="border: 1px solid black;">6.24</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Agua del NaOH</td> <td style="border: 1px solid black;">1.81</td> <td>T curado</td> </tr> <tr> <td>Agua libre</td> <td style="border: 1px solid black;">90.72</td> <td style="border: 1px solid black;">20</td> </tr> <tr> <td>NaOH</td> <td style="border: 1px solid black;">8.05</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CaO</td> <td style="border: 1px solid black;">16.09</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Agua Total</td> <td style="border: 1px solid black;">92.53</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ceniza</td> <td style="border: 1px solid black;">160.93</td> <td></td> </tr> <tr> <td>total</td> <td style="border: 1px solid black;">277.60</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							Material necesario		Características	Gramos de Na ₂ O	Gramos			6.24		Agua del NaOH	1.81	T curado	Agua libre	90.72	20	NaOH	8.05		CaO	16.09		Agua Total	92.53		Ceniza	160.93		total	277.60						
Material necesario		Características																																							
Gramos de Na ₂ O	Gramos																																								
	6.24																																								
Agua del NaOH	1.81	T curado																																							
Agua libre	90.72	20																																							
NaOH	8.05																																								
CaO	16.09																																								
Agua Total	92.53																																								
Ceniza	160.93																																								
total	277.60																																								
NOTAS:																																									

Cantidad de hidróxido de sodio necesario			
Pesos atómicos:			
	Na=	22.99	
	H	1	
	O=	16	
	C=	12.01	
Peso molecular	2(NaOH)	79.98	
	Na ₂ O	61.98	
Concentración de Na ₂ O en el 2(NaOH):		77.49	
Aportación de agua			
	NaOH		22.51
NaOH			
Concentración de Na ₂ O		77.49%	
concentración de agua		22.51%	
Cantidades de agua aportadas por el NaOH			
	NaOH		1.81 g de agua que aportará el NaOH

Las ecuaciones utilizadas para los cálculos de los porcentajes de CBCA, CaO, H₂O y NaOH se detallan a continuación:

$$\%CBCA_{dentro\ de\ la\ formulaci\acute{o}n} = \frac{100}{(1 + Ag/L) * (100 + \%CaO + \%Na_2O)}$$

$$\%CaO_{dentro\ de\ la\ formulaci\acute{o}n} = \frac{\%CBCA_{dentro\ de\ la\ formulaci\acute{o}n} * \%CaO}{100}$$

$$\%NaOH_{dentro\ de\ la\ formulaci\acute{o}n} = \frac{\%CBCA_{dentro\ de\ la\ formulaci\acute{o}n} * \%Na_2O}{100}$$

$$\%H_2O = Ag/L * \sum (\%CBCA + \%CaO + \%NaOH)_{dentro\ de\ la\ formulaci\acute{o}n}$$

La sumatoria de estos porcentajes debe ser del 100%, una vez obtenido los porcentajes de cada uno de los materiales dentro de la formulación, se prosigue a calcular en gramos el material necesario; pero antes se debe calcular el tamaño del lote.

Para el cálculo se utilizaron los siguientes datos:

Fechas de estudio de la pasta	7
Pastas por fecha	1
Pastas necesarias por formulación	7
Cubos extra	
Total de cubos	7
Densidad de cubo	2.2 g/cm³
Volumen de cubo	16.39 cm³
Peso total de cubos	252.36 g
Desperdicio	0.1 277.60 g
Experimentos	18
Total de pastas por experimentación global	126

Una vez calculado el tamaño del lote, se procedió a multiplicar el porcentaje de cada uno de los materiales dentro de la formulación por el tamaño del lote.

$$g_{CBCA} = \%CBCA_{dentro\ de\ la\ formulación} * TdeLote$$

$$g_{CaO} = \%CaO_{dentro\ de\ la\ formulación} * TdeLote$$

$$g_{NaOH} = \%NaOH_{dentro\ de\ la\ formulación} * TdeLote$$

Para el cálculo de la cantidad de agua es necesario tomar en cuenta el porcentaje de agua que aporta el NaOH, por lo que la cantidad de agua a añadir es llamada agua libre.

$$g_{H_2O\ libre} = (\%H_2O * TdeLote) - (g_{NaOH} * \%H_2O_{de\ NaOH})$$


Obteniéndose de esta manera las cantidades necesarias de cada uno de los materiales para la formulación.

%CBCA	%CaO	%Na ₂ O	Ag/L	Cantidad NaOH (g)	Agua adicional (g)	Agua Total (g)	Cantidad de CaO (g)	Cantidad de Ceniza (g)	Cantidad de Lote(g)
90	10	5	1.1	5.75	144.11	145.41	11.49	114.95	277.60
90	10	10	1.1	11.02	142.93	145.41	11.02	110.16	277.60
90	10	15	1.1	15.86	141.84	145.41	10.58	105.75	277.60
80	20	5	1	5.55	137.55	138.80	22.21	111.04	277.60
80	20	10	1	10.68	136.40	138.80	21.35	106.77	277.60
80	20	15	1	15.42	135.33	138.80	20.56	102.81	277.60
70	30	5	0.9	5.41	130.28	131.49	32.47	108.22	277.60
70	30	10	0.9	10.44	129.14	131.49	31.31	104.36	277.60
70	30	15	0.9	15.11	128.09	131.49	30.23	100.76	277.60

En el caso de los 9 sistemas de pastas que contenían Ca(OH)_2 se realizó otra hoja de cálculo de Excel, las ecuaciones que se aplicaron para el cálculo de la cantidad de material fueron las mismas que para pastas con CaO ; sin embargo fue necesario tomar en cuenta que el Ca(OH)_2 aporta agua a la mezcla, el cálculo del agua libre entonces consideró los gramos de Ca(OH)_2 añadidos y el porcentaje de agua aportado por esta cantidad de Ca(OH)_2 .

Para el cálculo de la cantidad de agua libre se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{gH}_2\text{O libre} = (\% \text{H}_2\text{O} * \text{TdeLote}) - (\text{gNaOH} * \% \text{H}_2\text{O de NaOH}) - [\text{gCa(OH)}_2 * \% \text{H}_2\text{O de Ca(OH)}_2]$$

 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo																													
Nombre:	Cinthya Valeska Castro Pérez	Área:	Cementos																										
Materia Prima:	CBCA e $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Fecha:	/05/2104																										
Tiempo de molienda:	C/M	Lote:	277.60 gramos																										
Experimento	CCA-10																												
Experimento	% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	% Na_2O	Temp de curado	% CBCA	Arena	Agua																							
CCA-10	10	5	20	90		0.5																							
%CBC	58.0%	% Na_2O	5%	Ligante %solidos 66.7% %agua 33.3%																									
% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	5.8%	Arena/Ligante	0																										
%NaOH	2.90%	Agua/Ligante	0.5																										
% H_2O	33.33%																												
	100.0%																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Material necesario</th> <th>Características</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Gramos</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>g de Na_2O</td> <td>6.24</td> <td rowspan="8"> T curado 20 </td> </tr> <tr> <td>Agua del $\text{Ca}(\text{OH})_2$</td> <td>3.91</td> </tr> <tr> <td>Agua del NaOH</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Agua libre</td> <td>86.81</td> </tr> <tr> <td>NaOH</td> <td>8.05</td> </tr> <tr> <td>Agua Total</td> <td>92.53</td> </tr> <tr> <td>$\text{Ca}(\text{OH})_2$</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>Ceniza total</td> <td>277.60</td> </tr> </tbody> </table>							Material necesario		Características		Gramos		g de Na_2O	6.24	T curado 20	Agua del $\text{Ca}(\text{OH})_2$	3.91	Agua del NaOH	2	Agua libre	86.81	NaOH	8.05	Agua Total	92.53	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	16	Ceniza total	277.60
Material necesario		Características																											
	Gramos																												
g de Na_2O	6.24	T curado 20																											
Agua del $\text{Ca}(\text{OH})_2$	3.91																												
Agua del NaOH	2																												
Agua libre	86.81																												
NaOH	8.05																												
Agua Total	92.53																												
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	16																												
Ceniza total	277.60																												
NOTAS:																													


Cantidad de hidróxido de sodio necesario e Ca(OH)_2			
1) Ca(OH)_2	Peso molecular	Ca(OH)_2	74.078
	Peso atómico:		
	Ca	40.078	
	CaO	56.078	
	Concentración de CaO en el Ca(OH)_2		75.70
	Aportación de agua		24.30
2) NaOH	Pesos atómicos:		
	Na=	22.99	
	H	1	
	O=	16	
	C=	12.01	
	Peso molecular	2(NaOH)	79.98
		Na_2O	61.98
	Concentración de Na_2O en el 2(NaOH):		77.49
	Aportación de agua	NaOH	22.51
	Concentración de Na_2O		77.49%
	concentración de agua		22.51%
cantidades de agua aportadas por el NaOH e Ca(OH)_2			
Ca(OH)_2		3.91	g de agua que aportará el Ca(OH)_2
NaOH		1.81	g de agua que aportará el NaOH
Total		5.7	

De modo que se obtuvieron las siguientes cantidades necesarias de cada uno de los materiales para la correspondiente formulación.

%CBCA	% Ca(OH)_2	% Na_2O	Ag/L	Cantidad NaOH (g)	Agua adicional (g)	Agua Total (g)	Cantidad de Ca(OH)_2 (g)	Cantidad de Ceniza (g)	Cantidad de Lote(g)
90	10	5	1	6.03	134.51	138.80	12.07	120.69	277.60
90	10	10	1	11.57	133.38	138.80	11.57	115.67	277.60
90	10	15	1	16.66	132.35	138.80	11.10	111.04	277.60
80	20	5	0.95	5.69	128.42	135.24	22.78	113.89	277.60
80	20	10	0.95	10.95	127.45	135.24	21.90	109.51	277.60
80	20	15	0.95	15.82	126.55	135.24	21.09	105.45	277.60
70	30	5	0.9	5.41	122.39	131.49	32.47	108.22	277.60
70	30	10	0.9	10.44	121.54	131.49	31.31	104.36	277.60
70	30	15	0.9	15.11	120.75	131.49	30.23	100.76	277.60

a) Para morteros

En el caso de los cálculos para las formulaciones de morteros, de igual manera se utilizó la hoja de cálculo de Excel, con la variante que el tamaño del lote es mayor, debido a la incorporación de arena en la formulación.

 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo																																									
Nombre: <u>Cinthya Valeska Castro Pérez</u>			Área: <u>Cementos</u>																																						
Materia Prima: <u>CBCA y CaO</u>			Fecha: <u>/05/2104</u>																																						
Tiempo de molienda: <u>C/M</u>			Lote: 984.21 gramos																																						
Experimento	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> CCA-1 ▼ </div>																																								
Experimento	% CaO	% Na ₂ O	Temp de curado	% CBCA	Arena	Agua																																			
CCA-1	10	5	20	90	3	0.5																																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">%CBCA</td> <td style="width: 15%;">14.5%</td> <td style="width: 15%;">%Na₂O</td> <td style="width: 15%; border: 1px solid black;">5%</td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;">Ligante</td> <td></td> </tr> <tr> <td>%CaO</td> <td>1.4%</td> <td>Arena/Ligante</td> <td style="border: 1px solid black;">3</td> <td></td> <td>%solidos</td> <td>66.7%</td> </tr> <tr> <td>%NaOH</td> <td>0.7%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>%agua</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>%H₂O</td> <td>8.33%</td> <td>Agua/Ligante</td> <td style="border: 1px solid black;">0.5</td> <td></td> <td>Arena</td> <td>75%</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>25%</td> <td></td> <td></td> <td>Ligante</td> <td>25%</td> </tr> </table>							%CBCA	14.5%	%Na ₂ O	5%		Ligante		%CaO	1.4%	Arena/Ligante	3		%solidos	66.7%	%NaOH	0.7%				%agua	33.3%	%H ₂ O	8.33%	Agua/Ligante	0.5		Arena	75%			25%			Ligante	25%
%CBCA	14.5%	%Na ₂ O	5%		Ligante																																				
%CaO	1.4%	Arena/Ligante	3		%solidos	66.7%																																			
%NaOH	0.7%				%agua	33.3%																																			
%H ₂ O	8.33%	Agua/Ligante	0.5		Arena	75%																																			
		25%			Ligante	25%																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Material necesario</th> <th style="text-align: center;">Características</th> </tr> <tr> <th style="text-align: left;">Gramos de Na₂O</th> <th style="text-align: center;">Gramos</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Arena</td> <td style="text-align: center;">5.53</td> <td rowspan="8" style="vertical-align: middle; text-align: center;"> T curado <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">20</div> </td> </tr> <tr> <td>Agua del NaOH</td> <td style="text-align: center;">738</td> </tr> <tr> <td>Agua libre</td> <td style="text-align: center;">1.61</td> </tr> <tr> <td>NaOH</td> <td style="text-align: center;">80.41</td> </tr> <tr> <td>CaO</td> <td style="text-align: center;">7.13</td> </tr> <tr> <td>Agua Total</td> <td style="text-align: center;">14.26</td> </tr> <tr> <td>Ceniza</td> <td style="text-align: center;">82.02</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td style="text-align: center;">142.64</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">984.21</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							Material necesario		Características	Gramos de Na ₂ O	Gramos		Arena	5.53	T curado <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">20</div>	Agua del NaOH	738	Agua libre	1.61	NaOH	80.41	CaO	7.13	Agua Total	14.26	Ceniza	82.02	total	142.64		984.21										
Material necesario		Características																																							
Gramos de Na ₂ O	Gramos																																								
Arena	5.53	T curado <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">20</div>																																							
Agua del NaOH	738																																								
Agua libre	1.61																																								
NaOH	80.41																																								
CaO	7.13																																								
Agua Total	14.26																																								
Ceniza	82.02																																								
total	142.64																																								
	984.21																																								
NOTAS:																																									

Cantidad de hidróxido de sodio necesario			
Pesos atómicos:			
	Na=	22.99	
	H	1	
	O=	16	
	C=	12.01	
Peso molecular	2(NaOH)	79.98	
	Na ₂ O	61.98	
Concentración de Na ₂ O en el 2(NaOH):		77.49	
Aportación de agua			
	NaOH	22.51	
Concentración de NaOH			
Concentración de Na ₂ O	77.49%		
concentración de agua	22.51%		
cantidades de agua aportadas por el NaOH			
NaOH	1.61	g de agua que aportará el NaOH	

Para realizar los cálculos de cada material en g, primero se hizo necesario la utilización de los valores que se presentan a continuación, para determinar el tamaño del lote.

Fechas de estudios de los morteros	7
Morteros por fecha	3
Morteros necesarios por formulación	21
Morteros extras	
Total de cubos	21
Densidad de cubo	2.6 g/cm³
Volumen de cubo	16.39 cm³
Peso total de cubos	894.73 g
Desperdicio	10% 984.21 g
Experimentos	18
Total de morteros por experimentación global	378

Como la relación Ar/L que se utilizó es 3/1, entonces representado en porcentaje se tiene que:

$$\%Ar = \frac{Ar}{Ar + L}$$

$$\%L = 1 - \%Ar$$

Una vez obtenido los porcentajes de Ar y L, se procedió a la obtención de los porcentajes de cada uno de los materiales dentro del 25% que ocupa el ligante, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\%CBCA \text{ dentro de la formulación} = \frac{100}{(1 + Ag/L) * (100 + \%CaO + \%Na_2O)} * \%L$$

$$\%CaO \text{ dentro de la formulación} = \frac{\%CBCA \text{ dentro de la formulación} * \%CaO}{100} * \%L$$

$$\%NaOH \text{ dentro de la formulación} = \frac{\%CBCA \text{ dentro de la formulación} * \%Na_2O}{100} * \%L$$

$$\%H_2O = [Ag/L * \text{suma}(\%CBCA + \%CaO + \%NaOH) \text{ dentro de la formulación}] * \%L$$

Una vez calculado los porcentajes se procedió a calcular las cantidades de los materiales en g, por medio de las ecuaciones siguientes:

$$gCBCA = \%CBCA \text{ dentro de la formulación} * TdeLote$$

$$gCaO = \%CaO \text{ dentro de la formulación} * TdeLote$$

$$gNaOH = \%NaOH \text{ dentro de la formulación} * TdeLote$$

$$gAr = \%Ar * TdeL$$

$$gH_2O \text{ libre} = (\%H_2O * TdeLote) - (gNaOH * \%H_2O \text{ de NaOH})$$

Las cantidades obtenidas para morteros CaO/CBCA se muestran a continuación:

%CBCA	%CaO	%Na ₂ O	Ag/L	Cantidad NaOH (g)	Agua adicional (g)	Cantidad de CaO (g)	Cantidad de Ceniza (g)	Arena (g)	Cantidad de Lote(g)
90	10	5	1.1	5.09	128.88	10.19	101.88	738.16	984.21
90	10	10	1.1	9.76	128.88	9.76	97.64	738.16	984.21
90	10	15	1.1	14.06	128.88	9.37	93.73	738.16	984.21
80	20	5	1	4.92	123.03	19.68	98.42	738.16	984.21
80	20	10	1	9.46	123.03	18.93	94.64	738.16	984.21
80	20	15	1	13.67	123.03	18.23	91.13	738.16	984.21
70	30	5	0.9	4.80	116.55	28.78	95.93	738.16	984.21
70	30	10	0.9	9.25	116.55	27.75	92.50	738.16	984.21
70	30	15	0.9	13.40	116.55	26.79	89.31	738.16	984.21

En el caso de los morteros $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ se procedió a realizar los mismos cálculos con la diferencia en el cálculo de la cantidad de agua libre, donde se incorpora el porcentaje de agua que aporta el Ca(OH)_2 añadido.

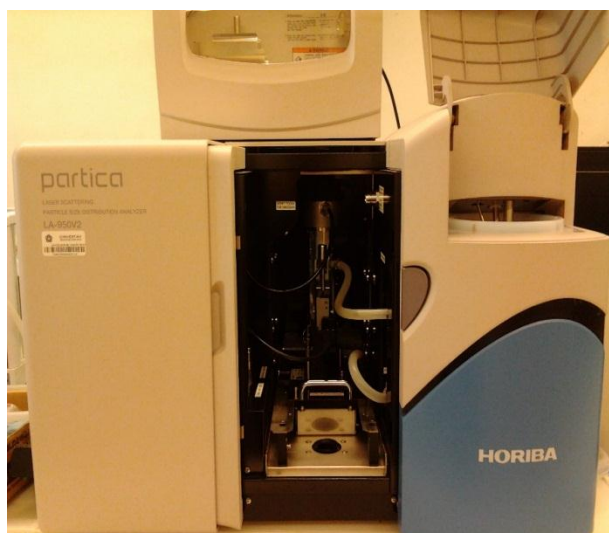
$$g\text{H}_2\text{O libre} = (\% \text{H}_2\text{O} * \text{TdeLote}) - (g\text{NaOH} * \% \text{H}_2\text{O de NaOH}) - [g\text{Ca(OH)}_2 * \% \text{H}_2\text{O de Ca(OH)}_2]$$

Las cantidades obtenidas para los morteros $\text{Ca(OH)}_2/\text{CBCA}$ se muestran a continuación.

%CBCA	% Ca(OH)_2	% Na_2O	Ag/L	Cantidad NaOH (g)	Agua adicional (g)	Cantidad de Ca(OH)_2 (g)	Cantidad de Ceniza (g)	Arena (g)	Cantidad de Lote(g)
90	10	5	1	5.35	123.03	10.70	106.98	738.16	984.21
90	10	10	1	10.25	123.03	10.25	102.52	738.16	984.21
90	10	15	1	14.76	123.03	9.84	98.42	738.16	984.21
80	20	5	0.95	5.05	119.87	20.19	100.94	738.16	984.21
80	20	10	0.95	9.71	119.87	19.41	97.06	738.16	984.21
80	20	15	0.95	14.02	119.87	18.69	93.47	738.16	984.21
70	30	5	0.9	4.80	116.55	28.78	95.93	738.16	984.21
70	30	10	0.9	9.25	116.55	27.75	92.50	738.16	984.21
70	30	15	0.9	13.40	116.55	26.79	89.31	738.16	984.21

Anexo 4. Serie de tamices y Ro-TaP utilizados para el análisis granulométrico del agregado fino



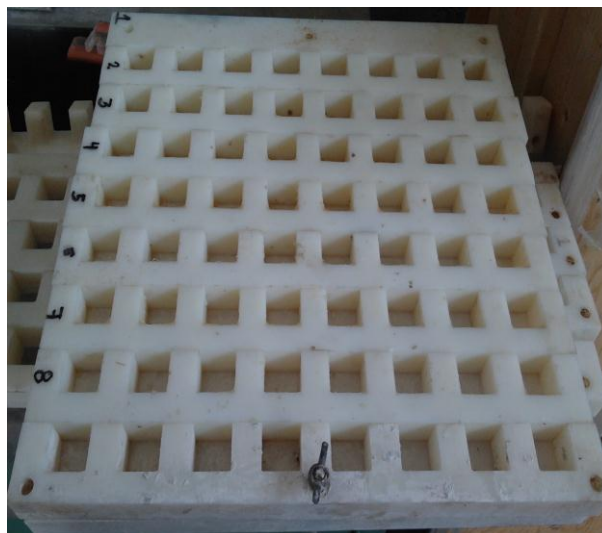
Anexo 5. Molino de atrición utilizado para la molienda de la CBCA**Anexo 6. Equipo de difracción láser para distribución de tamaño de partícula
Marca HORIBA, modelo LA-950V2**

Anexo 7. Mezcladora marca Hobart, modelo A200 capacidad de 5 L



Anexo 8. Mesa Vibrocompactadora marca CONTROLS, modelo CO159/Z0



Anexo 9. Moldes de Nylamid para pastas y morteros**Anexo 10. Horno de vacío marca VWR, modelo 1430-2**

Anexo 11. Máquina de ensayo mecánico marca Elite, modelo QTEST/100**Anexo 12. Molino planetario marca Retsch**

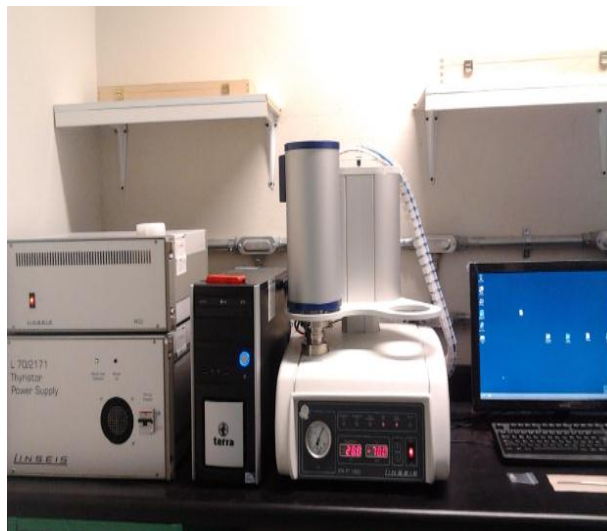
Anexo 13. Estufa para tratamiento térmico de morteros marca VWR Scientific modelo 1350 GM



Anexo 14. Mesa de fluidez para la determinación del porcentaje de fluidez de las pastas



Anexo 15. Analizador térmico diferencial gravimétrico simultáneo (Linseis L 70/2171, modelo Thyristor Power Supply ATD-TG)



Anexo 16. Microscopio Electrónico de Barrido marca Phillips modelo XL30ESEM



En el **Anexo 17** se presentan los resultados de RMC de morteros de CBCA sustituida a diferentes niveles por CaO curados hasta 28 días. Los valores de la izquierda debajo de la edad de ensayo, corresponden a la RMC en MPa y los valores de la derecha corresponden a la desviación estándar obtenida con un promedio de 3 cubos para cada sistema por cada día de ensayo.

Anexo 17. Resistencia mecánica a la compresión de morteros CaO/CBCA

Sistema	Ag/L	Ar/L	Edad de ensayo (días)									
			1		3		7		14		28	
CCA-1	1.1	3/1	0.20	0.10	0.46	0.31	1.00	0.22	1.10	0.11	1.51	0.09
CCA-2	1.1	3/1	0.13	0.02	0.56	0.11	0.82	0.11	0.88	0.21	0.99	0.22
CCA-3	1.1	3/1	0.09	0.08	0.27	0.24	0.93	0.10	0.70	0.11	0.80	0.05
CCA-4	1	3/1	1.37	0.06	2.63	0.25	4.11	0.17	4.25	0.45	4.23	0.65
CCA-5	1	3/1	1.57	0.42	2.03	0.49	2.78	0.50	4.46	0.74	4.77	0.69
CCA-6	1	3/1	0.52	0.03	0.93	0.24	1.90	0.04	1.85	0.23	2.21	0.51
CCA-7	0.9	3/1	2.38	0.17	2.94	0.24	4.21	0.23	5.20	0.50	5.10	0.54
CCA-8	0.9	3/1	0.19	0.10	0.36	0.22	1.14	0.16	1.76	0.21	1.93	0.30
CCA-9	0.9	3/1	1.34	0.41	3.00	0.51	4.21	0.13	4.61	0.50	5.38	0.10

En el **Anexo 18** se presentan los valores de resistencia obtenidos para los morteros de CBCA sustituida a diferentes niveles por $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Los valores de resistencia se listan debajo de las edades de ensayo. Los valores de la izquierda corresponden a la resistencia en MPa y los valores de la derecha corresponden a la desviación estándar obtenida con el promedio de tres cubos por cada edad de ensayo.

Anexo 18. Resistencia mecánica a la compresión de morteros $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /CBCA

Sistema	Ag/L	Ar/L	Edad de ensayo (días)									
			1		3		7		14		28	
CCA-10	1	3/1	0.14	0.00	0.20	0.12	0.77	0.09	0.86	0.05	1.17	0.35
CCA-11	1	3/1	0.13	0.00	0.73	0.23	0.85	0.28	0.41	0.04	0.61	0.07
CCA-12	1	3/1	0.15	0.02	0.27	0.02	0.16	0.05	0.27	0.03	0.25	0.08
CCA-13	0.95	3/1	1.85	0.05	2.68	0.14	3.39	0.55	4.04	0.28	3.86	0.69
CCA-14	0.95	3/1	1.82	0.33	2.00	0.16	1.76	0.26	1.87	0.22	1.63	0.11
CCA-15	0.95	3/1	0.36	0.18	0.19	0.10	0.53	0.07	0.53	0.01	0.76	0.16
CCA-16	0.9	3/1	4.95	0.82	4.20	0.55	5.95	0.30	5.24	0.50	5.48	0.54
CCA-17	0.9	3/1	0.32	0.07	0.59	0.03	1.17	0.09	1.22	0.19	1.66	0.18
CCA-18	0.9	3/1	0.65	0.06	1.31	0.56	1.72	0.37	2.32	0.23	2.55	0.13

Anexo 19. Resistencia mecánica a la compresión de morteros CaO/CBCA curados a 100°C y en agua y 100°C

Sistema	Ag/L	Ar/L	RMC a 100°C	DE	RMC en agua y 100°C	DE
CCA-1	1.1	3/1	0.16	0.11	1.76	0.16
CCA-2	1.1	3/1	0.85	0.30	0.85	0.15
CCA-3	1.1	3/1	0.60	0.14	0.68	0.07
CCA-4	1	3/1	2.84	0.43	2.57	0.31
CCA-5	1	3/1	3.55	0.64	3.39	0.51
CCA-6	1	3/1	0.73	0.12	1.17	0.41
CCA-7	0.9	3/1	2.21	0.12	2.90	0.45
CCA-8	0.9	3/1	0.99	0.30	0.96	0.14
CCA-9	0.9	3/1	2.45	0.10	2.66	0.25

Anexo 20. Resistencia mecánica a la compresión de morteros Ca(OH)₂/CBCA curados a 100°C y en agua y 100°C

Sistema	Ag/L	Ar/L	RMC a 100°C	DE	RMC en agua y 100°C	DE
CCA-10	1	3/1	1.28	0.14	1.32	0.20
CCA-11	1	3/1	2.31	0.13	NRCA*	NRCA*
CCA-12	1	3/1	0.02	0.03	NRCA*	NRCA*
CCA-13	0.95	3/1	2.60	0.14	1.99	0.70
CCA-14	0.95	3/1	1.03	0.07	1.12	0.50
CCA-15	0.95	3/1	2.30	0.20	2.30	0.19
CCA-16	0.9	3/1	4.13	0.43	4.05	0.29
CCA-17	0.9	3/1	2.20	0.84	1.25	0.19
CCA-18	0.9	3/1	1.34	0.39	1.47	0.48

*NRCA: No resistió curado en agua

Anexo 21. Cálculo de la composición química del geopolímero compuesto por Ca(OH)_2 -CaO/CBCA de reactivos y productos

Calculo de la composición química en % en peso de los reactivos SiO_2 , CaO, Al_2O_3 del geopolímero

$$\%C = (\%CBCA * CQ_{CBCA} *) + (\%CaO * CQ_{CBCA} *)$$

Sistema CCA-7, 30%CaO-70%CBCA, 5%Na₂O

$$\%\text{SiO}_2 = (0.70 * 53.310) + (0.30 * 2.00) = 37.917$$

$$\%\text{CaO} = (0.70 + 3.984) + (0.30 * 75.00) = 25.288$$

$$\%\text{Al}_2\text{O}_3 = (0.70 + 5.020) + (0.30 * 0.5) = 3.664$$

Se calculó por estequiometría el % en peso de Si, Ca y Al del geopolímero

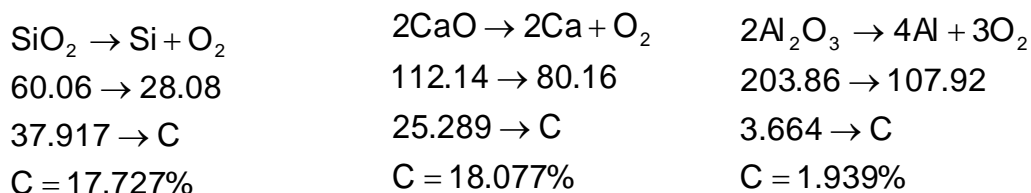


Tabla 28. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% del sistema CaO-CBCA de la formulación CCA-7

CQ_{CBCA}^*			Σ Si, Al, Ca de la CBCA	% en peso de SiO_2	% en peso de Al_2O_3	% en peso de CaO	Σ Si, Al, Ca del geopolímero
SiO_2	Al_2O_3	CaO					
17.727	1.939	18.077	37.743	46.968	5.137	47.895	100

CQ_{CBCA}^* : Composición química de la ceniza

Cálculo de los porcentajes en peso de los productos de reacción

Calcita: CaCO_3 , Ca:100%

Anortita: $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$

Determinación del peso molecular de la anortita

$$\text{PM}: (40.08 * 1) + (26.981 * 2) + (28.086 * 2) + (15.99 * 8) = 278.134\text{g/mol}$$

Determinación de los porcentajes en peso de los elementos de la anortita

$$PM_{Ca} = (40.08 * 1) = 40.08g/mol$$

$$PM_{Al} = (26.981 * 2) = 53.962g/mol$$

$$PM_{Si} = (28.086 * 2) = 56.172g/mol$$

$$X_{Ca} = \frac{40.08}{278.134} * 100 = 14.410\%$$

$$X_{Al} = \frac{53.962}{278.134} * 100 = 19.401\%$$

$$X_{Si} = \frac{56.172}{278.134} * 100 = 20.196\%$$

La sumatoria de los porcentajes en peso de los elementos de Ca, Al y Si es igual a:

$$\Sigma Ca, Al, Si = 14.410 + 19.401 + 20.196 = 54.007\%$$

Determinación de los porcentajes en peso de los elementos de la anortita en base al 100%

$$X_{Ca} = \frac{14.410}{54.007} * 100 = 26.682$$

$$X_{Al} = \frac{19.401}{54.007} * 100 = 35.923$$

$$X_{Si} = \frac{20.196}{54.007} * 100 = 37.395$$

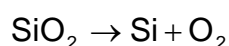
Sistema CCA-16, 30%Ca(OH)₂-70%CBCA, 5%Na₂O

$$\%SiO_2 = (0.70 * 53.310) + (0.30 * 0.460) = 37.455$$

$$\%CaO = (0.70 + 3.984) + (0.30 * 72.360) = 24.497$$

$$\%Al_2O_3 = (0.70 + 5.020) + (0.30 * 0) = 3.514$$

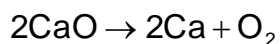
Se calculó por estequiometría el % en peso de Si, Ca y Al del geopolímero



$$60.06 \rightarrow 28.08$$

$$37.455 \rightarrow C$$

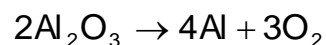
$$C = 17.511\%$$



$$112.14 \rightarrow 80.16$$

$$24.497 \rightarrow C$$

$$C = 17.510\%$$



$$203.86 \rightarrow 107.92$$

$$3.514 \rightarrow C$$

$$C = 1.860\%$$

Tabla 29. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% del sistema $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-CBCA}$ - de la formulación CCA-16

$\text{CQ}_{\text{CBCA}}^*$			Σ Si, Al, Ca de la CBCA	% en peso de SiO_2	% en peso de Al_2O_3	% en peso de CaO	Σ Si, Al, Ca del geopolímero
SiO_2	Al_2O_3	CaO					
17.511	1.860	17.510	36.881	47.48	5.043	47.477	100

$\text{CQ}_{\text{CBCA}}^*$: Composición química de la ceniza

Cálculo de los porcentajes en peso de los productos de reacción

Calcita: CaCO_3 , Ca:100%

Anortita: $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$

Determinación del peso molecular de la anortita

$$\text{PM}: (40.08 * 1) + (26.981 * 2) + (28.086 * 2) + (15.99 * 8) = 278.134\text{g/mol}$$

Determinación de los porcentajes en peso de los elementos de la anortita

$$\text{PM}_{\text{Ca}} = (40.08 * 1) = 40.08\text{g/mol}$$

$$\text{PM}_{\text{Al}} = (26.981 * 2) = 53.962\text{g/mol}$$

$$\text{PM}_{\text{Si}} = (28.086 * 2) = 56.172\text{g/mol}$$

$$X_{\text{Ca}} = \frac{40.08}{278.134} * 100 = 14.410\%$$

$$X_{\text{Al}} = \frac{53.962}{278.134} * 100 = 19.401\%$$

$$X_{\text{Si}} = \frac{56.172}{278.134} * 100 = 20.196\%$$

La sumatoria de los porcentajes en peso de los elementos de Ca, Al y Si es igual a:

$$\Sigma\text{Si, Al, Ca} = 14.410 + 19.401 + 20.196 = 54.007\%$$

Determinación de los porcentajes en peso de los elementos de la anortita en base al 100%

$$X_{\text{Ca}} = \frac{14.410}{54.007} * 100 = 26.682$$

$$X_{\text{Al}} = \frac{19.401}{54.007} * 100 = 35.923$$

$$X_{\text{Si}} = \frac{20.196}{54.007} * 100 = 37.395$$